

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Nikola Pek

Zagreb, 2018.godina.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Mirko Jakopčić, dipl. ing.

Student:

Nikola Pek

Zagreb, 2018.godina.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se izv. prof. dr. sc. Mirku Jakopčiću na stručnom vođenju kroz pripremu diplomskog rada, posebno se zahvaljujem izv. prof. dr. sc. Ivici Garašiću na stručnim savjetima, te izravnoj pomoći kod pripreme eksperimentalnog dijela. Također se zahvaljujem svim djelatnicima Katedre za zavarivanje, Katedre za nerazorna ispitivanja, Katedre za alatne strojeve, Laboratorija za ispitivanje mehaničkih svojstava, Katedre za materijale i tribologiju koji su mi stručnim savjetima i asistiranjem pomogli u izradi eksperimentalnog dijela.

Zahvaljujem se djelatnicima Đure Đakovića, Specijalna vozila, a posebno Mariu Jagnjiću dipl.ing.IWE, što su mi ustupili proizvodnu halu s robotom te omogućili izradu uzoraka.

Posebno se zahvaljujem svojim roditeljima Nevenki i Franji, sestri Nikolini te djevojci Albini na podršci i razumijevanju tijekom studija i pisanja ovog rada.

Nikola Pek



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje
Datum 17-01-2018 Prilog
Klasa: 602-04/18-6/3
Ur. broj: 15-1703-18-4

DIPLOMSKI ZADATAK

Student:

Nikola Pek

Mat. br.: 0035188590

Naslov rada na
hrvatskom jeziku:

**Optimizacija robotiziranog postupka zavarivanja tankih ploča od
aluminija EN AW 5754**

Naslov rada na
engleskom jeziku:

**Optimization of Robotized Process of Aluminium EN AW 5754 Thin
Panel Welding**

Opis zadatka:

Zavarivanje aluminija je, zbog specifičnosti materijala, tehnološki zahtjevno. Pri tome se traži i visoka kvaliteta zavarenoga spoja, sa zahtjevnim tolerancijama oblika i položaja proizvoda, kao što su, na primjer, ravnost i paralelnost ploha nakon zavarivanja. Kada se uz to postavi konstrukcijski zahtjev da se proizvod izrađuje od tankoga lima debljine od 1 do 5 mm, neupitna je potreba analize kvalitete zavara i unaprjeđenja procesa zavarivanja.

Namjera je proizvođača da dosadašnje ručno-elektrolučno zavarivanje namjenskih proizvoda od aluminija EN AW 5754 zamijeni zavarivanjem pomoću robota. Budući da se takvo zavarivanje u pojedinim tehnološkim značajkama razlikuje u odnosu na ručno zavarivanje, potrebno je provesti ispitivanja strukturnih i mehaničkih svojstava zavarenoga spoja izvedenog robotiziranim postupkom, uz kombinaciju odabranih parametara zavarivanja. Cilj je utvrditi najpovoljniju kombinaciju parametara zavarivanja kojom bi se ostvarila najveća produktivnost, uz postizanje tražene kvalitete zavara.

U ovom radu je potrebno:

1. opisati funkcionalne značajke robota za zavarivanje i prikazati glavne tehnološke parametre zavarivanja robotom
2. definirati kriterije za izradu ispitnih uzoraka koji će biti referentni za stvarni proizvod
3. izraditi ispitne uzorke prema definiranim kriterijima
4. provesti metalografsku analizu i mehaničko ispitivanje uzoraka, sukladno normi HRN EN ISO 15614-2 za aluminij
5. analizom rezultata ispitivanja utvrditi najpovoljniju kombinaciju parametara zavarivanja kojom se može postići najveća produktivnost i potrebna kvaliteta zavara
6. donijeti zaključak.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

16. studenog 2017.

Datum predaje rada:

18. siječnja 2018.

Predviđeni datum obrane:

24., 25. i 26. siječnja 2018.

Zadatak zadao:

Predsjednica Povjerenstva:

Izv. prof. dr. sc. Mirko Jakopčić

Prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	IV
POPIS TABLICA	VII
POPIS OZNAKA	VIII
SAŽETAK	IX
SUMMARY	X
1. UVOD	1
2. ALUMINIJSKE LEGURE	2
2.1. Povijest aluminija	2
2.2. Proizvodnja aluminija [2]	3
2.3. Osnovne vrste aluminija	7
2.4. Klasifikacija aluminijskih legura	7
2.5. Aluminij EN AW 5754	11
3. ZAVARIVANJE ALUMINIJA I ALUMINIJSKIH LEGURA	14
3.1. Karakteristike aluminija i aluminijskih legura [6]	14
3.2. Greške u zavarenom spoju	17
3.2.1. Pukotine	18
3.2.2. Uključci	20
3.2.3. Poroznost	20
3.2.4. Utjecaj topline u području ZUT-a	22
4. MIG POSTUPAK ZAVARIVANJA	23
4.1. Parametri zavarivanja	24
4.1.1. Napon zavarivanja	24
4.1.2. Struja zavarivanja	25
4.1.3. Promjer dodatnog materijala	25
4.1.4. Induktivitet	25

4.1.5.	<i>Slobodan kraj žice</i>	26
4.1.6.	<i>Zaštitni plinovi</i>	26
4.1.7.	<i>Položaj i njihanje pištolja za zavarivanje</i>	27
4.2.	Prednosti i nedostaci MIG postupka zavarivanja	28
4.3.	MIG zavarivanje aluminijskih legura	29
4.3.1.	<i>Određivanje osnovnih parametara impulsnog MIG zavarivanja</i>	29
4.3.2.	<i>Duljina slobodnog kraja žice</i>	29
4.3.3.	<i>Tehnike rada</i>	30
4.3.4.	<i>Izbor vrste i količine zaštitnog plina</i>	31
4.4.	Odabir dodatnog materijala	32
4.5.	CMT postupak zavarivanja	35
5.	TIG POSTUPAK ZAVARIVANJA	36
5.1.	Tehnika rada kod TIG zavarivanja	39
5.2.	Prednosti i nedostaci TIG zavarivanja	40
5.3.	Parametri TIG postupka zavarivanja	40
5.3.1.	<i>Odabir dodatnog materijala i volframove elektrode</i>	42
6.	ROBOTSKA STANICA ZA ZAVARIVANJE	43
6.1.	MOTOMAN ArcSistem VMF 500 S5D	43
6.2.	Uređaj za zavarivanje	46
7.	EKSPERIMENTALNI DIO	48
7.1.	Predobrada uzoraka	48
7.2.	Nerazorna ispitivanja	59
7.2.1.	<i>Vizualna metoda ispitivanja</i>	59
7.2.2.	<i>Ispitivanje penetrantima</i>	60
7.2.3.	<i>Radiografsko ispitivanje</i>	63
7.3.	Razorna ispitivanja	71
7.3.1.	<i>Priprema uzoraka</i>	71

7.3.2. <i>Makroizbrusci</i>	75
7.3.3. <i>Ispitivanje savijanjem</i>	82
7.3.4. <i>Ispitivanje kidanjem</i>	87
8. ZAKLJUČAK	100
9. POPIS LITERATURE	102

POPIS SLIKA

Slika 1. Tipovi elektrolitskih ćelija [2].....	4
Slika 2. Certifikat aluminij EN AW-5754 [25]	13
Slika 3. Područje smanjenja čvrstoće [6]	16
Slika 4. Mikrostruktura područja zavarenog spoja [6]	17
Slika 5. Najčešće greške zavarenog spoja Al-legura [6]	18
Slika 6. Utjecaj legirajućih elemenata na nastajanje toplih pukotina [7]	19
Slika 7. Topljivost vodika kod različitih temperatura u Al [9]	21
Slika 8. Shematski prikaz MIG postupka zavarivanja[11].....	23
Slika 9. Nagib pištolja kod zavarivanja aluminijskih legura [16]	30
Slika 10. Primjer zavarenog spoja s različitim parametrima [17]	31
Slika 11. Odabir dodatnog materijala [29]	33
Slika 12. Certifikat tvrtke [24]	34
Slika 13. Barkod sa pakovanja [24]	34
Slika 14. CMT postupak zavarivanja [26].....	35
Slika 15. Shematski prikaz TIG postupka zavarivanja [19]	36
Slika 16. Shematski prikaz TIG procesa zavarivanja [20]	37
Slika 17. Položaj pištolja i dodatnog materijala kod TIG zavarivanja[3]	39
Slika 18. Motoman zavarivački sustav [23]	43
Slika 19. Radni prostor zavarivačke stanice [24]	45
Slika 20. Robotska ruka i uređaji za zavarivanje [24].....	46
Slika 21. Uređaj za zavarivanje Fronius FK 4000-R [30].....	47
Slika 22. Identifikacijska pločica uređaja [24]	47
Slika 23. TruLaser 3060 [24]	48
Slika 24. Portalna glodalica Forest-Line [24]	49
Slika 25. Početak zavarivanja [24]	50
Slika 26. Nanošenje penetranta-Uzorak 8	61
Slika 27. Nanošenje penetranta-Uzorak 9	61
Slika 28. Razvijač nakon 10 minuta-Uzorak 8.....	62
Slika 29. Razvijač nakon 10 minuta-Uzorak 9.....	62
Slika 30. Razvijač nakon 15 minuta-Uzorak 8.....	62
Slika 31. Razvijač nakon 15 minuta-Uzorak 9.....	63
Slika 32. Parametri rendgenskog snimanja	63

Slika 33. Rendgen uređaj BALTEAU GM 300D	64
Slika 34. Skener uređaj VMI 3600SF	64
Slika 35. Uzorak sa svim indikatorima	65
Slika 36. Shematski prikaz izrade ispitnih uzoraka na zavarenom sučeljenom spoju prema normi HR ISO 15614-2	71
Slika 37. Shematski prikaz izrade ispitnih uzoraka na zavarenom kutnom spoju prema normi HR ISO 15614-2.....	72
Slika 38. Izrezivanje epruveta	72
Slika 39. Makroizbrusak prije potrebne obrade	73
Slika 40. Izgled makroizbruska nakon potrebne obrade	73
Slika 41. Epruveta prije brušenja	74
Slika 42. Epruveta nakon brušenja	74
Slika 43. Skica epruvete za statički vlačni pokus.....	74
Slika 44. Makroizbrusak - Uzorak 1	75
Slika 45. Makroizbrusak - Uzorak 2	76
Slika 46. Makroizbrusak - Uzorak 3	77
Slika 47. Makroizbrusak - Uzorak 10	78
Slika 48. Makroizbrusak - Uzorak 8 - početak zavarenog spoja.....	80
Slika 49. Makroizbrusak - Uzorak 8 - kraj zavarenog spoja	80
Slika 50. Makroizbrusak - Uzorak 9 - početak zavarenog spoja.....	81
Slika 51. Makroizbrusak - Uzorak 9 - kraj zavarenog spoja	82
Slika 52. Naprava za ispitivanje savijanjem.....	83
Slika 53. Kidalica EU 40 MOD	88
Slika 54. Epruveta 1-2	89
Slika 55. Dijagram sila-produljenje - epruveta 1-2	90
Slika 56. Epruveta 1-5	91
Slika 57. Dijagram sila-produljenje - epruveta 1-5	91
Slika 58. Epruveta 2-2	92
Slika 59. Epruveta 2-5	93
Slika 60. Epruveta 3-3	94
Slika 61. Dijagram sila-produljenje - epruveta 3-3	94
Slika 62. Epruveta 3-5	95
Slika 63. Dijagram sila-produljenje - epruveta 3-5	96
Slika 64. Epruveta 10-4	97

Slika 65. Dijagram sila-produljenje - epruveta 10-4	97
Slika 66. Epruveta 10-7	98
Slika 67. Dijagram sila-produljenje - epruveta 10-7	99

POPIS TABLICA

Tablica 1. Fizikalna svojstva čistog aluminija [3].....	6
Tablica 2. Mehanička svojstva nekih Al legura [6].....	10
Tablica 3. Kemijski sastav AW 5754 [22]	11
Tablica 4. Mehanička svojstva AW 5754 [22].....	12
Tablica 5. Fizikalna svojstva AW 5754 [22].....	12
Tablica 6. Ovisnost protoka zaštitnog plina o debljini žice [3] Error! Bookmark not defined.	
Tablica 7. Rezultati zavarivanja	51
Tablica 8. Kutni zavareni spojevi.....	52
Tablica 9. Rezultati radiografskog ispitivanja sučeljenog zavareno spoja.....	65
Tablica 10. Rezultati radiografskog ispitivanja kutnog zavarenog spoja.....	69
Tablica 11. Rezultati ispitivanja savijanjem – Uzorak 1	84
Tablica 12. Brojčane vrijednosti kutova – Uzorak 1	84
Tablica 13. Rezultati ispitivanja savijanjem - Uzorak 3	85
Tablica 14. Tablica 12. Brojčane vrijednosti kutova – Uzorak 3.....	86
Tablica 15. Rezultati ispitivanja savijanjem - Uzorak 10	86
Tablica 16. Brojčane vrijednosti kutova – Uzorak 10.....	87

POPIS OZNAKA

OZNAKA	JEDINICA	OPIS
R_p	N/mm^2	granica razvlačenja
R_m	N/mm^2	vlačna čvrstoća
E	%	elongacija
ρ	g/cm^3	gustoća
T_t	$^{\circ}C$	točka tališta
λ	$W/m \cdot K$	koeficijent toplinske vodljivosti
HB	HB	tvrdoća
d	mm	promjer trna
t_s	mm	debljina epruvete
l	mm	razmak između valjaka
T		faktor efikasnosti spoja
A	$^{\circ}$	kut savijanja

SAŽETAK

Tema ovog diplomskog rada je ispitivanje mogućnosti zavarivanja tankih ploča aluminijske legure EN AW 5754 pomoću robotske stanice. U radu je detaljno opisan proces nastanka aluminija i aluminijskih legura, svojstva aluminija i njegovih legura te su navedena dva najčešća postupka zavarivanja MIG i TIG, te je opisana robotska stanica na kojoj je proveden eksperimentalni dio. U eksperimentalnom dijelu rada provedeno je zavarivanje uzoraka, te njihovo ispitivanje prema normi HRN EN ISO 15614-2. Prema normi provedeno je ispitivanje nerazornim metodama i razornim metodama te su rezultati navedeni u radu. Od nerazornih metoda provedena je vizualna provjera uzoraka, rendgensko snimanje i ispitivanje penetrantima, a od razornih metoda provedeno je ispitivanje makro uzoraka, ispitivanje savijanjem epruveta, te ispitivanje kidanjem epruveta. Nakon ispitivanja provedena je analiza dobivenih rezultata te je na temelju rezultata donesen zaključak.

Ključne riječi: aluminijske legure, zavarljivost, robotsko zavarivanje, HRN EN ISO 15614-2.

SUMMARY

The topic of this graduate thesis is to examine the possibility of welding thin-walled aluminum alloy EN AW 5754 using a robotic cell. The paper describes the process of emergence aluminum and aluminum alloys, the properties of aluminum and its alloys, the two most commonly used welding procedures MIG and TIG, and the robotic cell on which the experimental part was performed. In the experimental part it was performed the welding of samples and their testing according to HRN EN ISO 15614-2. According to the standard, the study was conducted by non-destructive methods and destructive methods, and the results are listed in the paper. Of non-destructive methods were performed visual inspection of samples, x-ray and penetrant testing, and macroscopic examination, bending test, and tube fracture testing were performed from the destructive methods. After the examination, the analysis of the obtained results was carried out and based on the results the conclusion was made.

Keywords: aluminum alloys, welding, robotic welding, HRN EN ISO 15614-2.

1. UVOD

Razvojem moderne civilizacije sve više se javlja potreba za upotrebom lakih ali jednako tako i izdržljivih materijala. Zbog želje za uštedom resursa poput pogonskih goriva i distribucijom energije uz što manje gubitke javlja se potreba za materijalima koji imaju optimum svih tih vrijednosti. Aluminijske legure su upravo jedne od tih materijala koje se sve više koriste u raznim industrijama poput automobilske, zrakoplovne, brodogradnje, vojnoj industriji, elektroindustriji te još mnogim drugim. Sve većom upotrebom aluminijske i njegovih legura sve više se razvija tehnologija proizvodnje što rezultira boljim i izdržljivijim legurama. Uz tehnologiju proizvodnje razvijaju se i tehnologije spajanja aluminijskih legura, a samim time i proizvodnja dodatnih materijala za spajanje aluminijskih legura.

Iako se danas na tržištu mogu naći aluminijske legure veoma dobre kvalitete postoji problem njihovog spajanja da im se ne umanje mehanička ili ostala svojstva. Kod spajanja se koristi nekoliko postupaka kao što su zakivanje, lijepljenje i zavarivanje. Svaki od tih postupaka ima svojih prednosti i nedostataka i koristi se u određenoj grani proizvodnje. Zavarivanje aluminijskih legura je u većini industrijskih pogona najzastupljenije pa ne čudi činjenica kako se stalno traže novi načini i još kvalitetniji i brži postupci kojima će se unaprijediti zavarivanje aluminijskih legura.

Kod zavarivanja aluminijskih legura, kao i kod svakog zavarivanja moguća je pojava grešaka u zavarenom spoju koje rezultiraju nekvalitetnim spojem. Neke od tih grešaka bit će obrađene u ovom radu, a uz njih će se velika pozornost posvetiti postupcima zavarivanja te otežavajućim okolnostima koje dovode kod pojedinog postupka do nastanka grešaka i do same problematike zavarivanja aluminijskih legura.

2. ALUMINIJSKE LEGURE

2.1. Povijest aluminija

Humphry Davy pokušavao je oko 1807. godine, ali bez uspjeha, iz "zemlje" koju su nazivali alumina (prema lat. alumen alaun) izdvojiti metalni element čije je prisustvo u njoj pretpostavljao i koji je prema njoj nazvao aluminium. Tek 1825. god. Hans Ch. Ørsted uspio je izdvojiti malo tog nepoznatog metala iz njegovih klorida pomoću kalij-amalgama. Friedrich Wöhler nastavio je 1827. god. Ørstedove eksperimente, ali tek je 1845. god. uspio izdvojiti male kuglice duktilnog metala. Henri Sainte-Claire Deville izdvojio je električnom strujom 1854. god. iz dvojnog klorida aluminija i natrija, aluminij u većim količinama, a slične uspjehe imao je istovremeno i Robert Bunsen. Na svjetskoj izložbi 1855. god. "srebro iz gline" predstavljeno je široj publici [1].

Iako je izdvajanje aluminija iz zemlje na početku naišlo na probleme sve se to promijenilo 1866. godine kada je Werner Siemens napravio dinamo stroj te je time omogućena upotreba struje proizvoljnog napona i jakosti. Taj izum uvelike je doprinio napretku elektro metalurških postupaka što je kasnije 1866. godine dovelo do objave postupka dobivanja aluminija elektrolitičkim putem iz rastopljene otopine aluminij oksida u kriolitu. [1]

Nakon pronalaska postupka proizvodnja i prerada aluminija ubrzano raste te se počinje koristiti u pokrivanju krovova kuća, avio-industriji, izradi posuđa i mnoštvu drugih predmeta.[1]

Mala čvrstoća aluminija ograničavala je uporabu, ali uskoro je otkriven način kako povećati čvrstoću upotrebom legiranih elemenata. Godine 1906. Alfred Wilm pronašao je leguru "duraluminij" koja može dostići čvrstoću čelika. Duraluminij i slične legure omogućile su brzi razvoj avioindustrije. 1918. godine pronađene su legure Al-Cu-Mn, koje su čvrste u toplom stanju, i legure Al-Mg-Si. Godine 1921. otkrivena je eutektička legura za lijevanje, "silumin". "Aldrey", čvrsta legura za električne vodove, upotrijebljena je prvi puta 1924. godine [1].

Potreba za čvršćim i izdržljivijim materijalima tijekom godina unaprijedila je proizvodnju aluminijских legura te je svrstala aluminijске legure među glavne konstrukcijske materijale.

2.2. Proizvodnja aluminija [2]

Aluminij u svom prirodnom stanju nalazi se u zemljinoj kori i jedan je od važnijih sastojaka. On je male gustoće te u usporedbi s drugim metalima ima dosta nisku točku tališta (oko 660 °C). Njegova otpornost prema koroziji je izrazito visoka kao i prema drugim kemijskim utjecajima. Ta otpornost temelji se na stvaranju zaštitnog sloja na površini aluminija koji s kisikom stvara oksid koji štiti površinu od neželjene oksidacije.

Aluminij poput većine ostalih metala u prirodi nije u elementarnom stanju nego se nalazi pomiješan s oksidima drugih elemenata (silicij, titan, željezo, ...). Sadržaj metalnog aluminija u zemljinoj kori iznosi 8,13 % što odgovara sadržaju aluminijevog oksida Al_2O_3 od 15,3 %. Iako aluminijev oksid možemo naći u svim mineralima i stijenama njegovo ekonomsko značenje je nikakvo. Jedina ruda iz koje je moguće ekonomična eksploatacija aluminija je boksit. Ta ruda je dobila ime po mjestu u Francuskoj, Les Baux, u kojem su pronađene goleme naslage navedenog materijala.

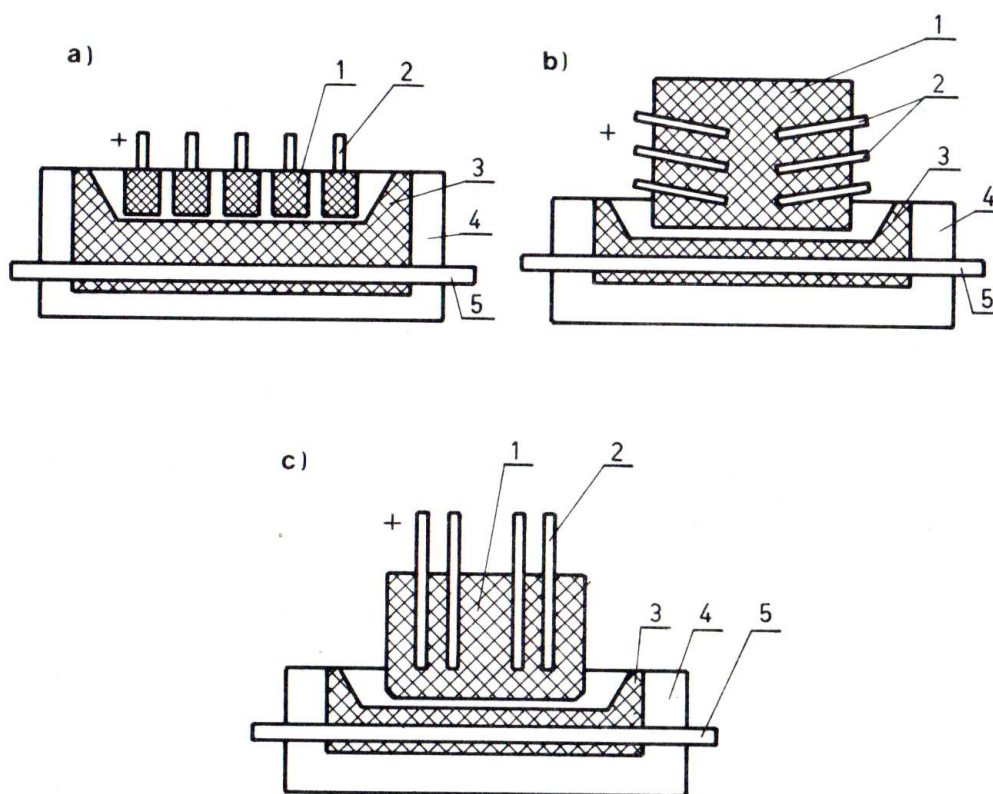
Tehnologija koja se danas upotrebljava u proizvodnji aluminija može se podijeliti u dvije glavne faze:

- Prerada aluminijevih ruda u tehnički čisti aluminijev oksid (glinica),
- Redukcija aluminijeva oksida elektrolitsko-rastopnim postupkom u aluminij.

Tehnološki princip proizvodnje primarnog aluminija bazira se na redukciji aluminijeva oksida u aluminij. Taj postupak izmišljen je od strane P.Herault i C.M.Hall 1866. godine te je time otvorena era tehničke primjene aluminija u širokom području. Problem koji se javlja kod tog postupka je taj da aluminijev oksid ima visoko talište i to oko 2000 °C te je potrebno uložiti previše energije u preradu, no taj se problem riješio tako da se aluminijev oksid miješa sa kriolitom (Na_3AlF_6) koji ima talište na 950 °C. Nakon prelaska u talinu aluminij se iz te taline odvaja elektrolizom na takozvanom katodnom dnu i na njemu ostaje odvojen zbog svoje gustoće. U procesu elektrolize kisik koji se odvaja na anodi spaja se s ugljikom na anodi i nastaje CO i CO_2 koji zatim u tom obliku napušta elektrolitsku ćeliju.

Cijeli proces elektrolize se odvija u kadama koje se nazivaju elektrolitske ćelije. Te ćelije napajaju se istosmjernom strujom jakosti od 30000 do 150000 A. Prikaz elektrolitskih ćelija vidljiv je na slici 1. Može se vidjeti kako postoje tri osnovna tipa elektrolitskih ćelija u kojima se odvija proces, a to su:

1. Čelija s blok anodama,
2. Čelija sa samopecivim anodama i horizontalnim anodnim dovodnicima,
3. Čelija sa samopecivim anodama i vertikalnim anodnim dovodnicima.



Slika 1. Tipovi elektrolitskih ćelija [2]

Svaka od ćelija sastoji se od pet osnovnih komponenti koje su neophodne kako bi cijeli proces mogao nesmetano funkcionirati. Svaka ćelija se sastoji od:

1. Anoda
2. Anodni dovodnici struje
3. Katoda (katodno dno)
4. Toplinska izolacija
5. Katodni dovodnici struje

Princip rada elektrolitske ćelije je taj da se na ćeliju dovodi napon iznosa od 4 do 4,5 V od čega svega 1,7 V bude iskorišteno na napon razlaganja, tj. udio elektrokemijskog rada. U teoriji se sa 1000 Ah može proizvesti 0,335 kg aluminija. Iskoristivost struje u procesu je između 85 i 90%. Cijeli sustav funkcionira na način da su ćelije međusobno povezane s aluminijskim

vodičima velikog presjeka, a isto tako su povezane i s ispravljačima struje. Zbog boljeg iskorištenja ispravljača međusobno spojene ćelije mogu biti spojene u seriju i do 200 komada. Ta serija je napravljena tako da u slučaju izvanredne situacije moguće je izdvojiti pojedinu ćeliju i zamijeniti je novom bez prekidanja procesa. Proces elektrolize se vrši tako da se u elektrolitsku ćeliju, postepeno kako teče redukcija, dodaje glinica i elektrolit (kriolit i aluminijev fluorid). Da bi se proces nesmetano odvijao potrebno je prije ulijevanja glinice i elektrolita probiti skrtnutu koru na površini. Nakon elektrolize pražnjenje aluminijskog izliva iz ćelija izvodi se isisavanjem pomoću vakuum lonca.

Zbog održavanja toplinske ravnoteže potrebno je povremeno regulirati razmak između donje površine anoda i površine aluminijskog izliva.

Kod procesa elektrolize moguća je pojava takozvanog anodnog efekta koji nastaje zbog velikog opadanja glinice u elektrolitu. Kada glinica opadne ispod neke razine napon u ćeliji poraste zbog izolirajućeg djelovanja plinskog sloja, koji se stvara ispod anode. Da bi se anodni efekt spriječio potrebno je u proces dodati još glinice. Cijeli proces elektrolize uvelike ovisi o ispravnosti triju faktora, a to su: jakost struje, razmak između elektroda i toplinska izolacija.

Pojava koja prati cijeli proces je znatno oslobađanje velikih količina plinova, fluornih spojeva, smolnih isparavanja i prašine. Kako bi se problem odstranjivanja nusprodukata proizvodnje riješio i zadovoljile ekološke norme koje su postavljene u pogon je potrebno instalirati uređaje i instalacije za odvođenje i pročišćavanje nastalih nusprodukata.

Najvažniji pokazatelji utroška energije i materijala za proces su [3]:

- istosmjerna el. energija 13700 do 16000 kWh/t,
- glinica 1900 kg/t,
- kriolit i Al-fluorid 45 do 60 kg/t,
- anodna masa 500 do 550 kg/t,

Proces dobivanja primarnog aluminijskog izliva završava u pećima za odstajivanje. Te peći imaju kapacitet od 5 do 20 t i u njima se vrši homogenizacija, otplinjavanje i dezoksidacija uložka. Nakon što se odrade svi potrebni procesi u peći za odstajivanje vrši se lijevanje aluminijskog izliva u poluge mase od 15 do 20 kg. Lijevanje u blokove nije jedina mogućnost proizvodnje aluminijskog izliva. U nekim slučajevima postrojenja s većim kapacitetom prerade i odgovarajućim nagibnim

pećima te bazenima za polukontinuirano lijevanje, mogu umjesto poluga lijevati blokove ili trupce određenih formata za daljnju preradu valjanjem ili prešanjem.

U tablici 1. prikazana su osnovna fizikalna svojstva čistog aluminija koji se dobije nakon prerade glinice i elektrolita.

Tablica 1. Fizikalna svojstva čistog aluminija [3]

Temperatura tališta, °C	660
Gustoća pri 20 °C, kg/m ³	2,7
Koeficijent linearnog istezanja, (0 – 100 °C), °C ⁻¹	23,5 x 10 ⁻⁶
Specifični toplinski kapacitet, (0 - 100 °C), J kg ⁻¹ °C ⁻¹	920
Koeficijent toplinske provodljivosti (0 – 100 °C), W m ⁻¹ K ⁻¹	240; (117- 155)*
Specifični električni otpor, (20 °C), Ω mm ² m ⁻¹	0,03
Modul elastičnosti, (20 °C), N/mm ²	71 900

* Za aluminijske legure

Osim primarnog aluminija postoji i sekundarni aluminij. Sekundarnim aluminijem smatra se onaj aluminij koji je dobiven iz otpadaka nastalih preradom ili upotrebom već korištenog aluminija. Sekundarni aluminij se nameće kao logičniji odabir zbog svoje ekonomske opravdanosti. Naime za proizvodnju sekundarnog aluminija upotrebljava se i do pet puta manje energije što se može vidjeti na sljedećim brojkama. Da se proizvede aluminij iz glinice potrebno je utrošiti između 15000 i 18000 kWh/t , a za proizvodnju sekundarnog aluminija potrebno je samo između 3000 i 5000 kWh/t. Mali korozijski utjecaj na proizvode od aluminija omogućava da se korišteni otpaci upotrebljavaju kao visoko vrijedan materijal čiji konačni proizvod neće imati puno slabija svojstva od proizvoda dobivenog primarnim aluminijem. Sekundarni aluminij se prvenstveno koristi u proizvodnji ljevačkih legura gdje je potreba za čistoćom aluminija i njegovim mehaničkim svojstvima nešto manja.

2.3. Osnovne vrste aluminija

Aluminij je klasificiran u mnogo manjih grupa prema različitim kriterijima. Jedan od najvažnijih kriterija za klasificiranje je njegova čistoća. Jedna od neslužbenih klasifikacija aluminija prema čistoći je [4]:

- < 99,5 % Al - slabo čist aluminij,
- 99,5 - 99,9 % Al - komercijalno čist aluminij (dobiva se taljevinskom elektrolizom),
- 99,9 - 99,95 % Al - jako čist aluminij,
- 99,9 % Al - „rafinat“,
- 99,95 - 99,999 % Al - aluminij visoke čistoće,
- > 99,999 % Al - aluminij ultra visoke čistoće.

Svaka od tih grupa ima svoje značenje i svoju ulogu u proizvodnji aluminijskih proizvoda. Grupa čistog aluminija je od 99,0 do 99,8%. Ako je stupanj čistoće ispod 99,0% radi se o aluminijima posebne namjene koji se koriste u postupcima dubokog izvlačenja (doze, posude, čepovi i sl.). Kod takvih čistoća željezo i silicij koji se nalaze u aluminiju ne smatraju se onečišćenjima nego im je sadržaj definiran gornjom i donjom granicom koncentracije, a definiran je i njihov međusobni odnos. Aluminij čistoće iznad 99,9%, kao što je prethodno navedeno, spada u grupu „rafinata“ s vrlo uskom i specijalnom primjenom.

Prema namjeni, aluminijski materijali dijele se u dvije osnovne grupe [2]:

- legure za preradu lijevanjem,
- legure za preradu gnječenjem.

Prerada gnječenjem obuhvaća aluminij i aluminijske legure, dok prerada lijevanjem obuhvaća u tehnici praktično samo tzv. ljevačke legure.

2.4. Klasifikacija aluminijskih legura

Klasifikacija koja se koristi u praksi razvijena je u Aluminium Association Inc., a usvojio ju je i ASTM i ostale relevantne norme. Sukladno toj klasifikaciji legure se označavaju brojevima prema osnovnom kemijskom sastavu na sljedeći način:

- Grupa 1xxx: označava čisti aluminij (99 % ili čišće). Nelegirani aluminij se razlikuje po čistoći, tj. po učešću pojedinih "nečistoća" (Fe, Si) u aluminiju. Posjeduje izvanrednu otpornost prema atmosferalijama, električnu vodljivost, odličnu toplinsku vodljivost i izvanrednu plastičnost (sposobnost oblikovanja). Ukupna primjena mu je vrlo raširena (građevinarstvo, elektroindustrija, petrokemija, kemijska industrija, dekorativna primjena). Dobro je zavarljiv.[5]

- Grupa 2xxx: legure na bazi bakra. Ova grupa daje najveće vrijednosti čvrstoće nakon ispravno provedene toplinske obrade. Legure ove grupe poznate su pod nazivom "durali". Upotrebljavaju se za radne, nosive dijelove. Imaju loša antikorozivna svojstva i zavarljivost. Ova legura često se prevlači s čistim aluminijem radi antikorozivne zaštite. Najčešće se upotrebljavaju u avioindustriji, naoružanju i mehaničkim dijelovima (zakovice, vijci).[5]

- Grupa 3xxx: glavni legirajući element je mangan. Legure ovog tipa ne mogu se toplinski obraditi. Dodatak mangana ograničen je na 1,5 %, a legure imaju umjerenu čvrstoću i pogodne su za obradu. Legura AlMn (3003) je najčešći predstavnik ove grupe. Ova legura ima izvrsnu plastičnost, otporna je na atmosferilije i dobro je zavarljiva. Upotrebljava se za duboka vučenja, izmjenjivače topline, pokućstvo i sl. Često upotrebljavana legura iz ove grupe je i AlMgMn (3004) iz koje se proizvode sva pakovanja za napitke (tzv. „can stock“) kao i za cijevi proizvedene iz trake elektrootpornim zavarivanjem. [5]

- Grupa 4xxx: glavni legirni element je silicij koji se može dodati u količinama koje su dovoljne da značajno snizi temperaturu taljenja ako se legura koristi kao dodatni materijal za zavarivanje ili lemljenje. Većina legura iz ove grupe nije toplinski obradiva. [5]

- Grupa 5xxx: glavni legirni element je magnezij, a ponekad se dodaju mangan i krom. Legure su dobro zavarljive i dobra im je otpornost na koroziju, ali je mogućnost hladne prerade ograničena. Legure s većim sadržajem magnezija odlično se ponašaju u morskoj atmosferi. Oblikovljivost opada s porastom sadržaja magnezija. Primjena im je vrlo raznovrsna: građevinarstvo, brodogradnja (nadgrađe, trup), uređaji za desalinizaciju morske vode, posuđe, različite cisterne i rezervoari.[5]

- Grupa 6xxx: legure ove grupe sadrže silicij i magnezij, što omogućava toplinsku obradu. Imaju dobru korozijsku otpornost i dobro su oblikovljive. Grupa se može podijeliti u dvije skupine:

a) veći udio silicija i magnezija uz dodatak mangana, kroma i cirkonija. Imaju bolja mehanička svojstva. To su najčešće legure 6005, 6061, 6082 i 6351. Upotrebljavaju se u nosivim elementima.[5]

b) manji udio silicija i magnezija što omogućuje velike brzine prešanja i odličnu oblikovljivost uz nešto lošija mehanička svojstva. Tipični predstavnik je legura 6060. Ova grupa ima široku primjenu u dekoraciji, izradi okvira prozora, vrata, fasade, cijevi, transportne opreme, jarboli i sl.

- Grupa 7xxx: legura s cinkom i magnezijem. Kad se doda još i bakar, legura posjeduje najveće mehaničke vrijednosti od svih Al-legura. Ove su legure poznate i pod nazivom "konstruktali". Ova se grupa Al-legura dijele na dvije grupe ovisno o tome da li sadrže bakar ili ga ne sadrže:

a) Legure s bakrom. Imaju najveće mehaničke vrijednosti. Zavariti se mogu jedino po specijalnim uvjetima. Loša su im antikorozivna svojstva. Tipična legura ove podgrupe je legura 7075. Najčešće se upotrebljava u avioindustriji i svemirskoj tehnici te naoružanju.

b) Legure koje ne sadrže bakar. Imaju nešto lošija mehanička svojstva od prethodne podgrupe, ali su otpornije na koroziju. Upotreba je u naoružanju i izradi nosivih elemenata. Tipična legura iz ove grupe je 7020.[5]

Mehanička svojstva pojedinih legura se razlikuju ovisno o vrsti legirnog elementa i ovisno o udjelu pojedinog legirnog elementa u leguri. Mehanička svojstva svake od skupina prikazana su u tablici 2.

Tablica 2. Mehanička svojstva nekih Al legura [6]

Legura	Serija	Tip	Internacionalne oznake	Raspon mehaničkih karakteristika (MPa)							
				0	100	200	300	400	500	600	700
Toplinski Neočvrstive legure	1000	Al	1050A 1070A 1100 1200 1080								
	3000	Al-Mn	3003 3004 3005 3105								
	5000	Al-Mg	5086 5083 5056A 5456 5052 5005 5454 5754 5254 5182								
Toplinski očvrstive legure	2000	Al-Cu Al-Cu-Mg	2011 2030 2017A 2618A 2024 (2124) 2014 (2214) 2219								
	6000	Al-Si-Mg	6005A 6060 6061 6082 6081 6106 6351								
		Al-Zn-Mg	7020 7021 7039								
	7000	Al-Zn-Mg-Cu	7049A 7175 7075 7475 7010 7150 7050								

Granica razvlačenja R_p

Prekidna čvrstoća R_m

2.5. Aluminij EN AW 5754

Aluminijska legura AW 5754 posebna je vrsta aluminija iz serije 5000. Ta vrsta aluminija zbog svoje kemijske strukture posjeduje nešto bolja svojstva u usporedbi s drugim legurama, poput poboljšane otpornosti na koroziju u morskim uvjetima i u industrijskim uvjetima gdje je atmosfera zagađenija industrijskim plinovima. Razlikuje se po povećanoj čvrstoći u odnosu na leguru 5251 koja je u istoj seriji. Poboljšana čvrstoća omogućava leguri AW 5754 primjenu na mjestima gdje su naprezanja materijala veća i zahtjevi za čvrstoćom veći. To su mjesta poput podova, kutnih nosača u raznim primjenama te mnoštvo funkcionalno opterećenih dijelova u raznim granama industrije od kojih su najzastupljenije industrije: brodogradnja, proizvodnja zakovica, automobilska industrija, proizvodnja ribičkog alata, industrija ambalaže za pakiranje hrane, izgradnja zavarenih kemijskih i nuklearnih postrojenja, vojna industrija.

U tablici 3. prikazan je kemijski sastav aluminijske legure AW 5754. U kemijskom sastavu vidljivo je da udio magnezija ima značajnu ulogu i da je ograničen s minimalnom i maksimalnom vrijednošću jer samo u tim vrijednostima se dobiju konačna svojstva legure koja su propisana standardom.

Tablica 3. Kemijski sastav AW 5754 [22]

%	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Ga	V	Mn+Cr
min.	-	-	-	-	2,60	-	-	-	-	-	-	0,10
max.	0,40	0,40	0,10	0,50	3,60	0,30	-	0,20	0,15	-	-	0,60

U tablici 4. dane su mehaničke vrijednosti aluminijske legure AW 5754 i to za podvrstu H22. Naime mehanička svojstva u ostalim podvrstama se malo razlikuju u jednoj vrijednosti, a to je vrijednost minimalne elongacije.

Tablica 4. Mehanička svojstva AW 5754 [22]

<i>Svojstvo</i>	<i>Vrijednost</i>
Granica elastičnosti	130 MPa
Vlačna čvrstoća	220-270 MPa
Elongacija	7% min.
Tvrdoća u Brinelima	63 HB

Osim kemijskih i mehaničkih svojstava svaka legura ima svoja fizička svojstva po kojima se u nekim pogledima razlikuje od osnovnog materijala i ostalih legura. Mehanička svojstva aluminijske legure AW 5754 prikazana su u tablici 5.

Tablica 5. Fizikalna svojstva AW 5754 [22]

<i>Svojstvo</i>	<i>Vrijednost</i>
Gustoća	2,66 g/cm ³
Točka tališta	600 °C
Koeficijent linearnog istezanja	24 * 10 ⁻⁶ K ⁻¹
Modul elastičnosti	68 GPa
Koeficijent toplinske provodljivosti	147 W/m*K
Električni otpor	0,049 * 10 ⁻⁶ Ω*m

Usporedivši fizikalna svojstva sa svojstvima čistog aluminija vidljivo je da se svojstva legure razlikuju od svojstava čistog aluminija. Iako to nisu velike razlike u nekim slučajevima te razlike imaju veliku ulogu u upotrebi pojedine legure za industrijske svrhe.

Na slici 2. prikazan je certifikat koji je izdan od prodavača aluminijskog materijala i u kojem su navedena točna testirana i izmjerena mehanička i kemijska svojstva aluminijskog materijala koji je korišten u zavarivanju testnih uzoraka. Zbog načina proizvodnje i nejednolikog doziranja legirajućih elemenata svaka serija koja izlazi iz tvornice ima malo drugačija mehanička svojstva

i kemijsku strukturu, a certifikat koji je izdan od strane proizvođača garantira da ta serija ima točno ta mehanička svojstva i točno tu provjerenu kemijsku strukturu.

INSPECTION CERTIFICATE	No: 1874	CERTIFIED SRAC-ROnet	vinetco SLATINA
	Date: 8/24/2017	ISO 9001:2008 No. 10/valia 2017	

CUSTOMER : KLOECKNER METALS AUSTRIA GmbH

CONTRACT/ORDER : 4500943358
BILL OF DELIVERY : 80331328
TRUCK/CONTAINER : AG 13 KNP/ AG13 KLN

MATERIAL : ALUMINIUM SHEETS
ALLOY : EN AW-5754 **TEMPER:** H22
LOT/DIMENSIONS (mm): 80054902 - 4X1500X3000

ACCORDING TO : EN 485-515 573; EN 15089

MECHANICAL PROPERTIES		1 MPa = 1 N/mm2 = 0.145 ksi = 0.102 kgf/mm2					
1 lbs = 0.4536 kg		Rm		Rp0.2		Elong. %	Hardness*
		MPa		MPa			HB
		min.	max.	min.	max.	min.	min.
Specified values:		220	260	140	220	11	

LOT / BATCH	CASE	NET WEIGHT kg	Measured values:			
00254902 S17075723	364362;364378; 364470	2974	260 259	211 210	16 17	

CHEMICAL COMPOSITION %												
BATCH	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Ga	V	Al
S17075723	0.21	0.25	0.04	0.17	3.1	0.025	0.01	0.035	0.016	0.009	0.015	REM. REM REM
Acc. Standard	Min.				2.6							REM
	Max.	0.4	0.4	0.1	0.5	3.6	0.3	0.05	0.2	0.15	0.05	
	Remarks: 0.10-0.6 Mn+Cr					Other- Each- Max.: 0.05			Others Total- Max.: 0.15			

REMARKS: MECHANICAL PROPERTIES IN ACCORDING TO ORDER BENDING TEST OF 90 DEGREES RADIUS ACCEPTED
 ACCORDING TO EN 10204 2004 3.1
 ACCORDING TO EN 485-2 2013 EN 515 1994; EN 573-2 2013 FN15086 2005

CE 0038-CPR-M-084-2015

ALRO S.A. SLATINA, Ploesti Street 116 Cluj County, Romania
No. 07 - ALRO-CPR-AM-116 H22 COLD ROLLED SHEET

EN 15089 2005

PRODUCED IN ALRO S.A. H22 4X 3000X2000
 Material acc. to standard and supplier specification
 Dimensions: 4000x1500x2000
 Chemical acc. to EN 5754-2 2013
 Tensile strength acc. to EN 5754-2 2013
 Yielding strength acc. to EN 5754-2 2013
 Bending RPD
 Tensile strength acc. to EN 5754-2 2013
 Quality class 1
 Registered supplier of ALRO S.A.

Marius Olteanu, Eng. **ALRO S.A. No 116, Ploesti Street Phone: +40(0) 0249 426 117; 0249 432 956 alro@alro.ro**

330048-Slatina-ROMANIA **Fax: +40(0) 0249 411 487; 0249 415 992 www.alro.ro**

cod FI-31PO-051/Rev 1/2016

QUALITY CONTROL DEPT

SC ALRO SA SLATINA
Punct de lucru Slatina
Str. Milcov Nr. 1, Jud. Cluj
Serv. Inspectia Calitatii

Slika 2. Certifikat aluminij EN AW-5754 [25]

3. ZAVARIVANJE ALUMINIJA I ALUMINIJSKIH LEGURA

Aluminij se koristi u gotovo svim granama industrije što ga svrstava među najkorištenije metale u svijetu. Neki proizvodi od aluminija se mogu dobiti lijevanjem, lijepljenjem, valjanjem, zakivanjem ili nekim drugim postupkom koji danas poznajemo no ti postupci ne zadovoljavaju industrijske potrebe koje nameće proizvodnja. Kako bi se zadovoljile sve potrebe izmišljeni su postupci zavarivanja kojima se spajaju aluminijske legure. Iako je zavarivanje aluminijskih legura danas rutinski posao postoje razni utjecaji zbog kojih varira kvaliteta zavarenog spoja. Zavarivanje aluminija, za razliku od čeličnih proizvoda, pred zavarivača i proces zavarivanja postavlja niz novih uvjeta koje je potrebno zadovoljiti kako bi se postupak nesmetano odvijao.

3.1. Karakteristike aluminija i aluminijskih legura [6]

Prednosti koje aluminij ima u pogledu korozijske postojanosti i nekih drugih dobrih svojstava otežavaju proces zavarivanja i zahtijevaju upotrebu posebnih strojeva, određenih plinova i posebnih tehnika zavarivanja.

Prva bitna karakteristika aluminija je njegova prirodna oksidna kožica – Al_2O_3 koja je debljine oko 0,01 mm na hladnom materijalu. Taj oksidni sloj materijalu daje dobru kemijsku otpornost no zbog iznimno visoke temperature taljenja (2050 °C) taj sloj predstavlja problem kod zavarivanja. Ako se taj sloj ne odstrani prije ili u toku zavarivanja dolazi do taljenja osnovnog materijala ispod oksidnog sloja i nemogućnosti zavarivanja. Oksidni sloj ukoliko nije pravilno očišćen s zavarivane površine može se pomiješati s talinom i nakon stvrdnjavanja osnovnom i dodatnog materijala u zavarenom spoju ostaje kao uključak unutar zavara te mu tako smanjuje mehanička svojstva i povećava mogućnost nastajanja pukotina. Zbog trenutnog stvaranja oksidnog sloja na površini dodatnog i osnovnog materijala nije moguće dobiti homogeni zavareni spoj. Da bi se zavarivanje uspješno provelo potrebno je u procesu zavarivanja uništiti oksidni sloj i ne dozvoliti kisiku da dođe do aluminija kako bi se formirao novi oksidni sloj. To se radi tako da se koristi električni luk kojem je elektroda priključena na „+“ pol, a na mjesto zavarivanja se konstantno upuhuje zaštitna atmosfera inertnog plina kako bi se odstranio kisik iz tog područja.

Sljedeća bitna karakteristika aluminijske legure je njena veoma dobra toplinska vodljivost. Toplinska vodljivost čistog aluminijske legure iznosi $240 \text{ Wm}^{-1}\text{°C}^{-1}$, a za aluminijske legure iznosi između 117 i $155 \text{ Wm}^{-1}\text{°C}^{-1}$. Takva dobra toplinska vodljivost stvara probleme kod zavarivanja jer se toplota unosi u materijal brzo širi po cijelom volumenu te otežava taljenje materijala. Da bi zavarivanje bilo moguće potrebni su snažni koncentrirani tokovi energije i visoki toplinski unos unatoč činjenici da je temperatura tališta niska. Ukoliko se zavaruje sa slabim i nedovoljno koncentriranim tokovima energije dolazi do nastanka široke zone utjecaja topline što uzrokuje omekšanu strukturu u tom području. Dobra toplinska vodljivost osim što stavlja dodatne zahtjeve pred uređaje kojim se zavaruje uzrokuje i poroznost u zavarenom spoju. Kod zavarivanja obradaka većih debljina potrebno je prije zavarivanja predgrijavanje kako bi se izbjegla pojava poroznosti.

Kod elektrootpornog zavarivanja problem predstavlja jaka električna vodljivost. Da bi se uspješno provelo elektrootporno zavarivanje potrebno je u slučaju aluminijskih legura narinuti veliku jakost struje na elektrode, a istodobno je potrebno skratiti vrijeme zavarivanja što stavlja velike zahtjeve na uređaje za elektrootporno zavarivanje.

Sljedeća bitna karakteristika je veliki koeficijent toplinskog istezanja koji uzrokuje velika stezanja i deformacije materijala. Nakon zavarivanja i unosa topline u materijal zavareni spoj se ubrzano hladi i dolazi do velikih sila unutar materijala koje ga deformiraju no osim deformacije materijala one uzrokuju mikro ili makro napuknuća u zavarenom spoju ili u zoni utjecaja topline što dodatno oslabljuje zavareni spoj, a u nekim slučajevima taj zavareni spoj nije zadovoljavajućih karakteristika pa je potrebno ponovo provesti postupak zavarivanja.

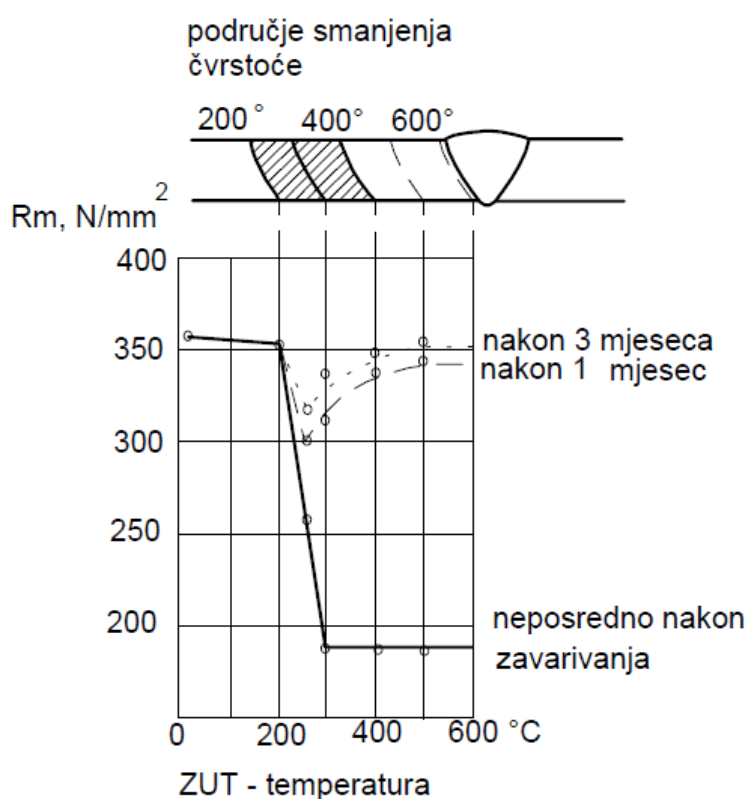
Aluminij i njegove legure imaju veliku rastvorljivost vodika u rastaljenom materijalu. Problem kod velike rastvorljivosti vodika u rastaljenom materijalu je taj da kod kristalizacije, tj. hlađenja rastaljenog materijala i formiranja krutine, rastvorljivost naglo pada pa se atomi vodika međusobno spajaju i formiraju molekule koje zbog velikog volumena formiraju mjehuriće vodika unutar materijala koji izazivaju poroznost zavarenog spoja.

Sljedeća osobina bitna je samo za zavarivanje, a to je da kod zagrijavanja aluminij ostaje iste boje za razliku od čelika. Ta osobina nam onemogućava procjenu trenutne temperature aluminijske legure prije prelaska u talinu što može dovesti do poteškoća kod zavarivanja i lemljenja.

Aluminij i aluminijske legure u znatnoj su mjeri sklone vrućim pukotinama, a nešto manje su sklone hladnim pukotinama što često produžuje proces zavarivanja. Produžuje ga tako što ako

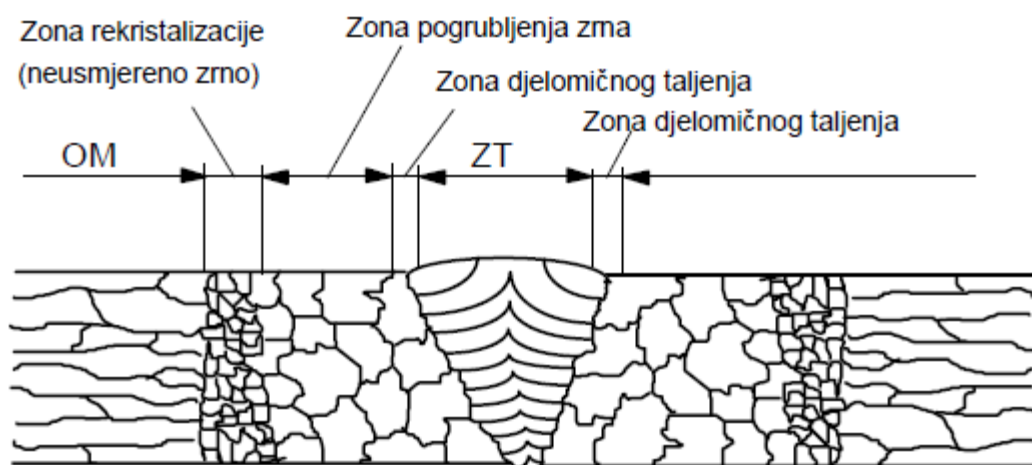
nastanu pukotine koje se ne mogu nikako spriječiti potrebno je proces zavarivanja ponoviti. Pojava toplih i hladnih pukotina ponajviše ovisi o kemijskom sastavu i uvjetima zavarivanja.

Zavarivanje aluminijskih materijala uzrokuje omekšanje materijala na mjestu zavarenog spoja. Kod proizvodnje ploča ili profila koji se zavaruju koristi se hladna deformacija koja znatno očvršćuje materijal dok se u zoni zavara zbog taljenja materijala javlja ljevačka struktura koja ima manju čvrstoću pa samim time zavareni spoj postaje mjesto najmanje čvrstoće. Zbog takvog ponašanja aluminija i njegovih legura uslijed zavarivanja u nekim industrijama je još uvijek neprihvatljivo zavarivanje kao proces spajanja. Jedna od tih industrija je avio industrija u kojoj se umjesto zavarivanja koriste zakovani spojevi i svornjaci slični zakovicama napravljeni od titan legure. Na slici 3. vidljivo je na kojem se dijelu materijala najviše smanjila čvrstoća. Kao što prikazuje dijagram neposredno nakon zavarivanja pad čvrstoće je jednakomjeran u zavarenom spoju i u užem području zone utjecaja topline, no nakon nekog vremenskog perioda kao što je u dijagramu navedeno 1 i 3 mjeseca vidi se da se čvrstoća u zavarenom spoju vratila skoro pa u početnu vrijednost dok je čvrstoća na području zone utjecaja topline i to u području od 200 do 400 °C ostala smanjena .



Slika 3. Područje smanjenja čvrstoće [6]

Na slici 4. vidljiva je mikrostruktura zavarenog mjesta i zone utjecaja topline. Stanje u mikrostrukturi direktno utječe na čvrstoću tog djela materijala. Kao što je vidljivo na slici 3. u kojem je području najmanja čvrstoća tako se može vidjeti na slici 4. da je u tom području zona rekristalizacije te da je u toj zoni zrno neusmjereno što izaziva znatan pad čvrstoće. Nešto bolja situacija je u zoni pogrubljenja zrna gdje je došlo do pada čvrstoće ali puno manjeg pada nego u zoni rekristalizacije. U zoni djelomičnog taljenja mehanička svojstva su zadovoljavajuća ako je zavareni spoj homogen, a jednako tako je u samom području zavarenog spoja. U tim područjima mehanička svojstva mogu biti i bolja od mehaničkih svojstava osnovnog materijala ako je zavareni spoj napravljen bez grešaka.

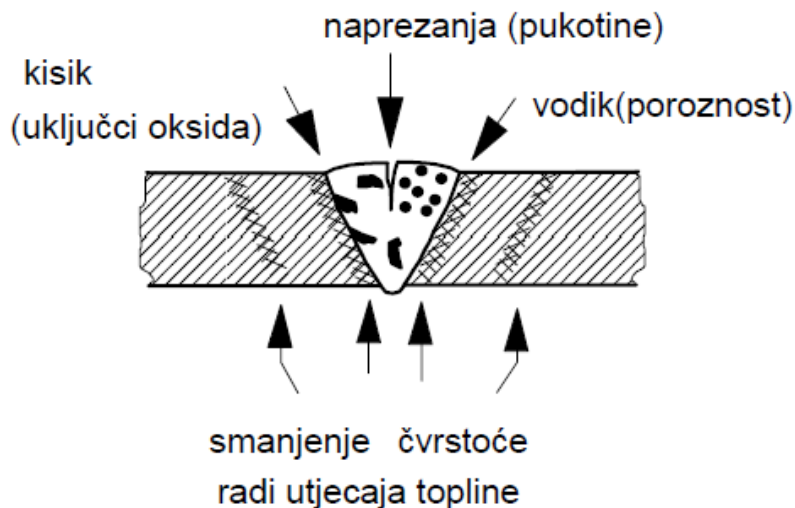


Slika 4. Mikrostruktura područja zavarenog spoja [6]

3.2. Greške u zavarenom spoju

Tijekom zavarivanja bilo kojeg materijala moguća je pojava grešaka zavarivanja. Te greške mogu uzrokovati razni čimbenici. Neke od njih uzrokovane su ljudskom greškom, neke karakteristikama materijala, neke odabirom dodatnog materijala, neke odabirom postupka i još mnogim okolnostima koje se mogu dogoditi tijekom procesa zavarivanja. Da bi se greške izbjegle potrebno je strogo kontrolirati proces zavarivanja i prilagoditi sve uvjete i parametre zavarivanja na optimalnu vrijednost. I kad su svi uvjeti postavljeni na optimalnu vrijednost moguća je pojava grešaka pa zbog toga postoji niz naknadnih ispitivanja da bi se ustanovilo

postojanje ili nepostojanje određene greške. Neke od najčešćih grešaka kod zavarivanja aluminijских materijala prikazane su na slici 5.



Slika 5. Najčešće greške zavarenog spoja Al-legura [6]

Na slici 4. vidljive su četiri vrste grešaka, a to su:

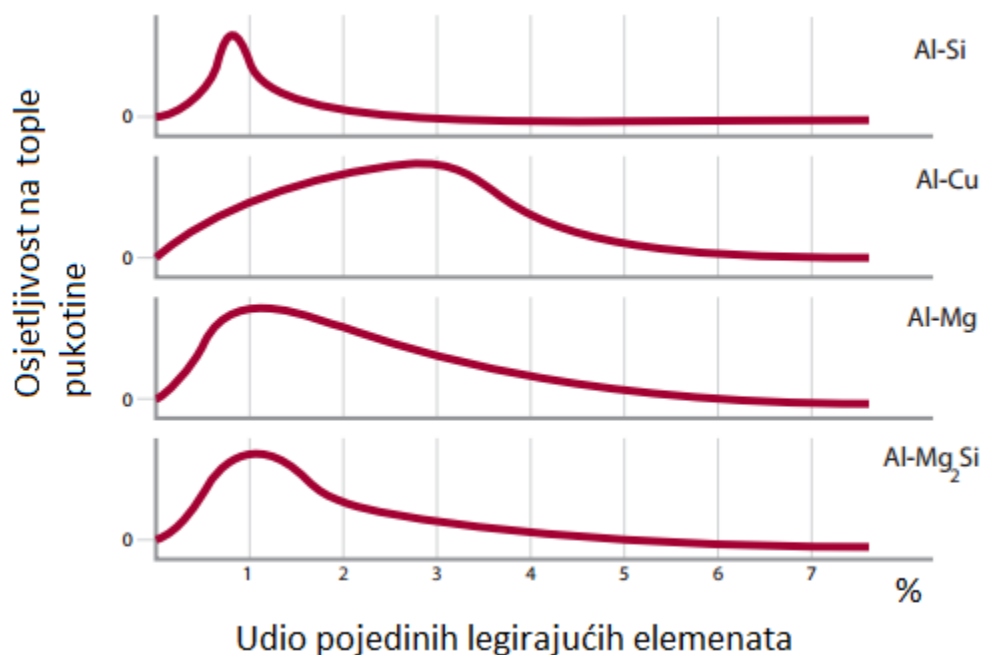
- Pukotine,
- Uključci,
- Poroznost,
- Utjecaj topline u području ZUT-a.

Svaka od navedenih grešaka nastaje zbog određenih parametara i uslijed poklapanja određenih okolnosti tijekom zavarivanja.

3.2.1. Pukotine

Pukotine u području zavora nastaju uslijed velikih naprezanja koja se javljaju u osnovnom materijalu i u zoni utjecaja topline. Na slici 4. pukotina je prikazana na području zavora jer se tamo najčešće pojavljuje, no osim te zone potrebno je još promatrati i zonu utjecaja topline jer je pojava pukotina moguća i u toj zoni. Neki od glavnih utjecaja koji uzrokuju tople pukotine su: kemijski sastav osnovnog i dodatnog materijala, način kristalizacije, segregiranje reakcijskih naprezanja, režim zavarivanja, stupanj miješanja osnovnog i dodatnog materijala.

Utjecaj legirnih elemenata na nastajanje toplih pukotina ima velik značaj. Ovisno o vrsti i udjelu legirnog elementa povećava se ili smanjuje vjerojatnost nastanka toplih pukotina. Na slici 6. prikazana je ovisnost nastajanja toplih pukotina o udjelu i vrsti legirnog elementa. [7]



Slika 6. Utjecaj legirajućih elemenata na nastajanje toplih pukotina [7]

Na slici 6. vidi se da dodavanjem pojedinog legirnog elementa do nekog postotka raste vjerojatnost za nastanak toplih pukotina, a nakon što dođe do najveće vjerojatnosti svaki postotak koji se dodaje smanjuje vjerojatnost nastanka toplih pukotina. Također se može vidjeti po različitosti krivulja da za različite legirne elemente imamo različit udio koji ima najveći utjecaj na nastajanje toplih pukotina.

Kako bi se spriječilo nastajanje toplih pukotina upotrebljavaju se dvije metode: [7]

1. Zavarivanje Al legure koja ima nisku osjetljivost na tople pukotine, uz korištenje dodatnog materijala sličnog kemijskog sastava kao i osnovni materijal.
2. Zavarivanje Al legure sa visokom osjetljivošću na tople pukotine, gdje je potrebno koristiti dodatni materijal različitog kemijskog sastava koji ima znatno manju osjetljivost na tople pukotine.

3.2.2. *Uključci*

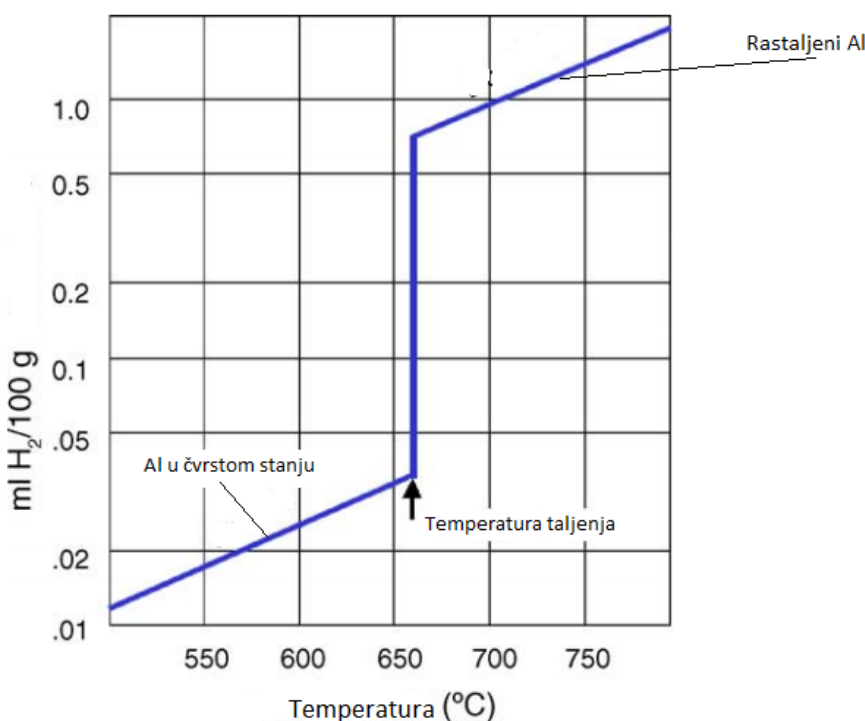
U svakom postupku zavarivanja i kod svakog materijala koji se zavaruje mogu nastati različite vrste uključaka. Za aluminij i aluminijske legure specifično je nastajanje uključaka koji imaju strukturu Al_2O_3 , tj. aluminijevih oksida. Svaka aluminijska legura je prekrivena aluminijskim oksidima debljine od 1 do 3 nm. Kod zavarivanja ili nekih drugih toplinskih postupaka dolazi do povećanja temperature te se debljina tog oksidnog sloja povećava i do 10 puta. Zbog visoke temperature taljenja, Al_2O_3 (2050°C), i veće gustoće oksida koja iznosi 4 g/cm^3 , za razliku od aluminijeve od $2,7 \text{ g/cm}^3$, aluminijev oksid uzrokuje poteškoće kod zavarivanja. Zato što je teško rastaljiv i veće gustoće događa se da komadići oksida upadaju u talinu i nakon skrućivanja taline ostaju zarobljeni unutar zavara što se naziva uključcima. Ti uključci osim što smanjuju mehanička svojstva, jako su hidroskopni pa uzrokuju stvaranje još jedne nepravilnosti, a to je poroznost. Nisu električki vodljivi pa povećavaju električni otpor materijala. Zbog svih tih nedostataka potrebno je ukloniti oksidni sloj prije zavarivanja. Uklanjanje oksidnog sloja ovisi o vrsti postupka zavarivanja. Kod MIG zavarivanja oksidni sloj se uklanja na način da se elektroda spoji na „+“ pol izvora napajanja. Spajanjem na „+“ pol i zatvaranjem strujnog kruga tijekom zavarivanja dobiva se efekt da teški ioni udaraju u površinu materijala i na taj način uništavaju i „dobre“ oksidni sloj na mjestu zavarivanja. [8]

3.2.3. *Poroznost*

Veliki problem kod zavarivanja aluminija i aluminijskih legura uzrokuje poroznost. Utjecaj poroznosti vidljiv je u smanjenju vlačne čvrstoće i uzrokovanju zamora materijala. Poroznost zavarenog spoja nastaje zbog utjecaja vodika. problem koji se javlja u aluminiju i aluminijskim legurama je taj što se topivost vodika u talini i krutom materijalu uvelike razlikuje. Aluminij je specifičan po tome što može rastopiti veliku količinu vodika u tekućem stanju koji se nakuplja u kristalnoj rešetci. Taj vodik dolazi iz raznih izvora poput zaštitnih plinova, nečistoća, vlage, zraka i ostalih pojava koje mogu nastupiti u trenutku zavarivanja. Nakon završetka zavarivanja i brzog hlađenja zavarenog spoja, atomi vodika ostaju zarobljeni u rešetci i zbog slabe topivosti vodika u krutom stanju počinju se spajati u molekule vodika. Molekule su specifične po tome što su višestruko većeg volumena od atoma i kada se počinju skupljati na nekom mjestu nastaju mjehurići vodika zarobljeni u zavarenom spoju. Ti mjehurići nazivaju se poroznost zavarenog spoja. Da bi se spriječilo takvo ponašanje vodika potrebno je omogućiti vodik da izađe iz

područja zavarivanja u znatnoj mjeri i to od 90 do 95%. Taj postupak se zove otplinjavanje. Za uspješno otplinjavanje potrebno je predgrijavanje i manja brzina zavarivanja što rezultira grubljom strukturom zrna u zavarenom spoju i zoni utjecaja topline, a također se povećava zona utjecaja topline te se tako smanjuju mehanička svojstva zavarenog spoja. Sljedeći način kojim se može smanjiti nastanak poroznosti je stvaranje bolje okoline u kojoj se zavaruje. To podrazumijeva temeljito čišćenje površine na mjestu zavarenog spoja, čišćenja površine dodatnog materijala, sušenje dodatnog i osnovnog materijala od vlage, primjena žice većeg promjera, korištenje zaštitnog plina velike čistoće te korištenje posebnih postupaka zavarivanja kao što je impulsno MIG zavarivanje. Impulsno MIG zavarivanje promjenom jakosti struje u procesu zavarivanja daje dobre rezultate vezane za otplinjavanje pa samim time nije potrebno prethodno predgrijavati materijal, a brzina zavarivanja može ostati optimalna.

Na slici 7. prikazan je dijagram ovisnosti količine otopljenog vodika o temperaturi aluminija. Može se vidjeti kako je u krutom stanju topivost vodika znatno manja nego u rastaljenom te da uslijed prelaska iz krutog u tekuće stanje na 660 °C dolazi do naglog skoka moguće količine rastaljenog vodika u materijalu.



Slika 7. Topljivost vodika kod različitih temperatura u Al [9]

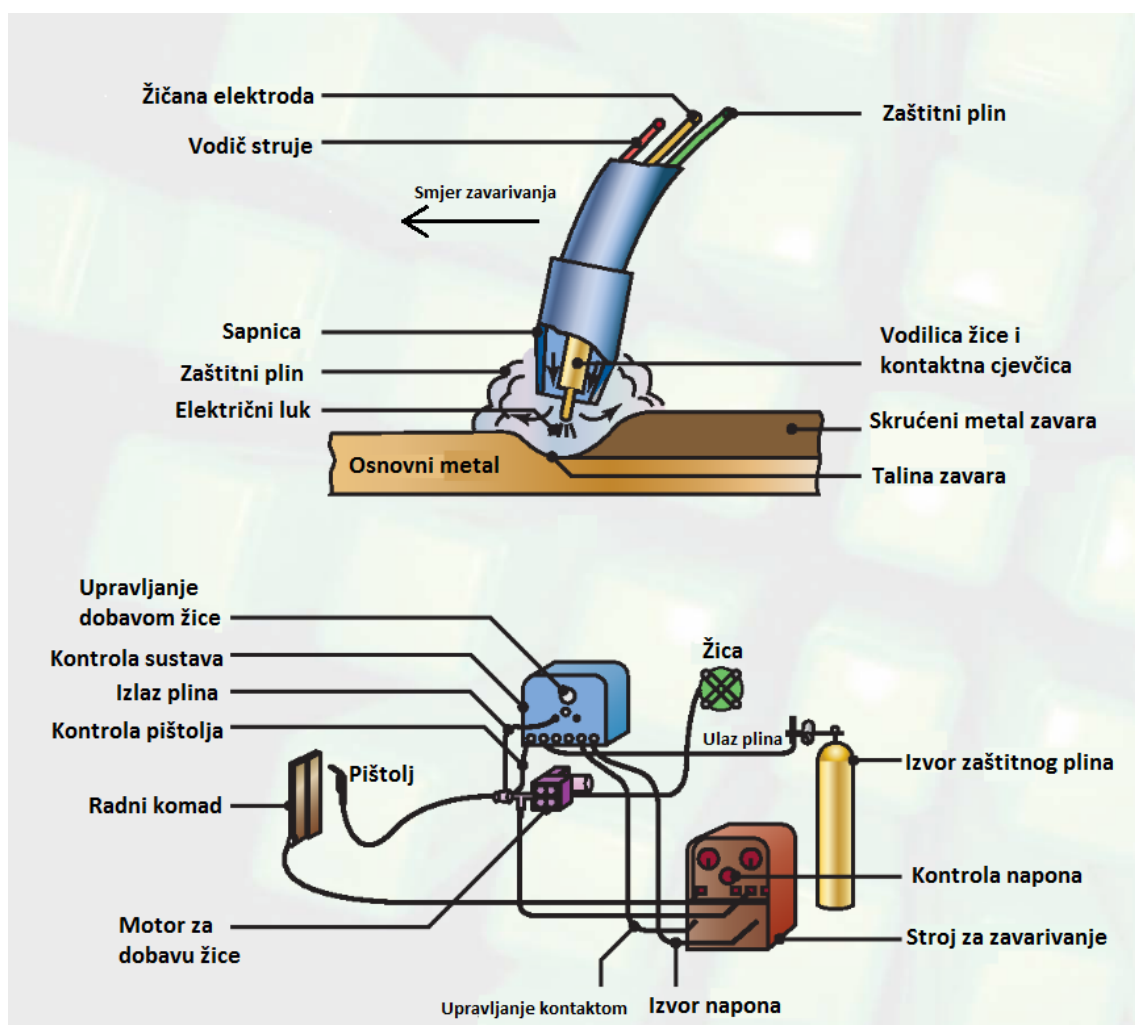
3.2.4. Utjecaj topline u području ZUT-a

Zbog velike toplinske vodljivosti aluminijskih materijala koja može biti i do 3 puta veća nego kod čelika zona utjecaja topline se povećava i proširuje. Zbog takve karakteristike materijala potrebno je unositi više topline u materijal da bi ga se održalo rastaljenim što smanjuje brzinu zavarivanja i dubinu protaljivanja, ubrzava skrućivanje zrna, smanjuje mogućnost otplinjavanja i povećava mogućnost nastajanja poroznosti i naljepljivanje materijala. Proširivanje zone utjecaja topline smanjuje mehanička svojstva zavara, a i osnovnog materijala koji se našao u toj zoni što je negativna i neprihvatljiva značajka. Kako bi se ti nedostaci uklonili potrebno je predgrijavanje ili povećanje unosa energije odnosno povećanjem učinka električnog luka. Povećanje učinka električnog luka može se postići povećanjem jakosti struje zavarivanja ili mješavinom plinova Ar i He. Kod te mješavine povećava se i kvaliteta zavarenog spoja u usporedbi s čistim helijem. [8]

4. MIG POSTUPAK ZAVARIVANJA

MIG (engl. Metal Inert Gas) zavarivanje je elektrolučni postupak zavarivanja taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi inertnog plina. Najčešći plinovi koji se koriste za MIG zavarivanje su argon i helij te njihove mješavine. Električni luk se uspostavlja između žice koja je dodatni materijal i ujedno elektroda i osnovnog materijala te tako uzrokuje taljenje te žice i osnovnog materijala te formiranje zavarenog spoja. Postupak zavarivanja može biti automatski (potpuno mehaniziran), poluautomatski (dodavanje žice je mehanizirano, a vođenje i držanje pištolja je ručno) te robotizirano. [10]

MIG postupak zavarivanja je iznimno kompleksan i precizan postupak i zahtjeva precizno funkcioniranje svih njegovih komponenti. Za bolju predodžbu postupka na slici 8. prikazan je shematski prikaz MIG postupka.



Slika 8. Shematski prikaz MIG postupka zavarivanja[11]

Način rada MIG postupka, koji je prikazan na slici 8., bazira se na istodobnom dovodenju žice, koja se nalazi na kolutu s žicom, zaštitnog plina, koji je pohranjen u čeličnoj boci i dovodi se preko sapnice u područje zavarivanja, i struje zavarivanja, koja se kabelima dovodi od izvora napajanja do pištolja za zavarivanje. Struja zavarivanja se kontaktnom cjevčicom prenosi na žicu koja zatim zatvara strujni krug preko radnog komada. Radni komad je spojen s masom na izvor napajanja i tako je strujni krug zatvoren u potpunosti što omogućuje zavarivanje.

Zavarivanje u nekim slučajevima velikih radnih komada može biti otežano i to tako da je nemoguće ili veoma komplicirano dovesti izvor napajanja do mjesta zavarivanja pa su potrebni koaksijalni kabeli za veću udaljenost. U takvim slučajevima kada je udaljenost veća od 5 metara primjenjuje se dodatni pogon za dodavanje žice smješten u samom pištolju. Taj pogon se koristi da bi se spriječilo gužvanje žice unutar cijevnog vodiča, a isto tako se koristi i kod nekih specijalnih načina zavarivanja za precizno dodavanje dodatnog materijala. Takav sistem se zove „push-pull“ sistem i još mu je bitna primjena kod manjih debljina žica i kod dodatnih materijala koji su mekši poput aluminija i njegovih legura.[12]

4.1. Parametri zavarivanja

Da bi se postupak zavarivanja uspješno proveo potrebno je prilagoditi različite parametre na propisane vrijednosti ili eksperimentalno odrediti potrebne parametre kako bi zavareni spoj imao najbolja svojstva. Glavni parametri procesa su struja, napon, brzina zavarivanja, slobodni kraj žice i promjer elektrode. Postoje i drugi parametri kao što je orijentacija elektrode i vrsta elektrode koji također utječu na mehanizam prijenosa materijala. Navedeni parametri nisu međusobno neovisni. Struja i napon ovise o izlaznim karakteristikama izvora, a napon ovisi ne samo o duljini luka već i o slobodnom kraju žice i o vrsti zaštitnog plina. [13]

Neki od gore navedenih parametara biti će detaljnije obrađeni u sljedećem tekstu.

4.1.1. Napon zavarivanja

Napon struje zavarivanja je jedan od glavnih parametara. Njegovim povećanjem povećava se duljina električnog luka i dobije se širi zavareni spoj. Ukoliko zavareni spoj ima ugorine to je znak da je napon previsok. Veći napon kod kratkog električnog luka će smanjiti frekvenciju kratkih spojeva što ima za posljedicu povećanje kapljica rastaljenog materijala pa dolazi do

povećanog prskanja, a s druge strane prenizak napon može uzrokovati ulijetanje nerastaljene žice u talinu te otežano uspostavljanje električnog luka. [14]

Napon je veoma bitan faktor kod zavarivanja tankih radnih komada. Na tim komadima je potrebno imati kratki električni luk koji omogućava brže zavarivanje bez opasnosti od propaljivanja, no da bi se to ostvarilo potrebno je frekvenciju držati dovoljno visokom da bi se dobio stabilan električni luk. Također je napon bitan kod formiranja kutnih spojeva jer u tom slučaju moraju se dobiti blagi prijelazi kako ne bi došlo do nepovoljnih zarezni djelovanja. [14]

4.1.2. Struja zavarivanja

O struji zavarivanja direktno ovisi količina rastaljenog materijala. Dakle ako se povećava iznos struje zavarivanja može se uvelike povećati brzinu zavarivanja, te sam promjer žice može biti veći za veće struje zavarivanja. Veći promjer žice i veća brzina zavarivanja povećavaju ekonomičnost postupka što je danas veoma bitno. [14]

4.1.3. Promjer dodatnog materijala

Kao što je u prethodnom tekstu rečeno promjer dodatnog materijala uzima se s obzirom na jakost struje. Kod MIG postupka za razliku od ručnog elektrolučnog postupka promjer dodatnog materijala ne određuje jakost struje. Kod ručnog elektrolučnog postupka promjer dodatnog materijala je direktno određivao jakost struje i to tako da se uzima jakost struje otprilike 30-40 puta veća nego je sam promjer, no kod MIG postupka za jednak promjer dodatnog materijala mogu se koristiti različiti iznosi struje. Zbog širokog pojasa struja koje se mogu koristiti kod nekog promjera potrebno je znati da je prijenos materijala kod zavarivanja tanjom žicom stabilniji. [14]

4.1.4. Induktivitet

Za ispravno postavljanje parametara zavarivanja za određeni promjer žice potrebno je koristiti ispravan induktivitet. Kratak električni luk je vrlo osjetljiv na induktivitet. Niske vrijednosti

induktiviteta će imati prepoznatljiv zvuk i pružit će koncentrirani električni luk, ali u isto vrijeme će se povećati prskanje. Veće vrijednosti induktiviteta daju mekši zvuk te povećavaju širinu taline. Sam efekt induktiviteta moguće je poništiti ukoliko se povećaju kapljice rastaljenog materijala. [14]

4.1.5. Slobodan kraj žice

Slobodni kraj žice je duljina elektrode od kontaktne cjevčice do električnog luka. Povećanje duljine slobodnog kraja žice zbog većeg razmaka pištolja od radnog komada za specifične parametre povećava depozit rastaljenog dodatnog materijala zbog Julove topline. Slobodni kraj žice kreće se od 5 do 15 mm za zavarivanje kratkim spojevima odnosno do 25 mm za druge vrste prijenosa materijala (mješoviti, štrcajući luk). Prevelik slobodni kraj žice povećava vjerojatnost upadanja nerastaljene žice u talinu, a prekratak slobodni kraj žice može dovesti do zataljivanja elektrode za kontaktnu cjevčicu. Ukoliko je slobodni kraj žice prevelik može doći do problema naljepljivanja. Zbog problema koje uzrokuje slobodni kraj žice potrebno je paziti da tijekom cijelog procesa zavarivanja slobodni kraj žice bude konstantan tj. da se tijekom zavarivanja kontaktna cjevčica ne približi ili ne udalji previše od radnog komada. [13, 14]

4.1.6. Zaštitni plinovi

Zaštitni plinovi kod MIG postupka bitno određuju kvalitetu zavarenog spoja. Njihova svrha je da zaštite talinu zavara kod skrućivanja. Odabir zaštitnog plina treba biti veoma dobro proučen jer pravilan odabir plina može rezultirati većom brzinom zavarivanja te većom količinom depozita. Kao zaštitni plinovi koriste se čisti plinovi kao što su argon i helij, ali također i njihove mješavine. Svaki od plinova ima neke prednosti i nedostatke koji utječu na postupak zavarivanja. Njihovom kombinacijom nastoji se dobiti idealan zaštitni plin za svaki postupak. Sljedeći uvjet za pouzdan plin je nivo čistoće samog plina. To se zahtijeva zato jer i mali postotak vlage može prouzročiti poroznost ili adsorpciju vodika u metal zavara. Točka rosišta plina mora biti ispod $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ da ne dođe do rošenja i tako dovodenja vlage u zavareni spoj. Kod svakog postupka zavarivanja veoma je bitno paziti na stanje opreme kojom se zavaruje, pa tako i na boce i spremnike, ventile te cijevi kojima se dovodi plin kako bi se dobio kvalitetan zavareni spoj.

Protok zaštitnog plina koji se koristi kod zavarivanja ovisi o promjeru žice, jakosti struje zavarivanja, obliku spoja, mjestu i uvjetima zavarivanja. Prilikom zavarivanja kratkim spojevima i mješovitim lukom optimalna količina zaštitnog plina trebala bi iznositi 10 puta promjer žice. Kod štrcajućeg i impulsnog luka zbog većih struja i veće brzine zavarivanja koristi se veći protok zaštitnog plina.[3]

U tablici 6. prikazana je ovisnost protoka zaštitnog plina o debljini žice kod konvencionalnog postupka MIG zavarivanja.

Tablica 6. Ovisnost protoka zaštitnog plina o debljini žice [3]

Promjer žice, mm	Potrošnja plina, l/min
0,8	6-8
1,0	9-10
1,2	10-12
1,6	14-16

4.1.7. Položaj i njihanje pištolja za zavarivanje

Položaj zavarivačkog pištolja je također bitan parametar jer o njemu ovisi dubina i širina zavora. Kod lijeve tehnike zavarivanja zavareni spoj će biti plići i širi, dok kod desne tehnike je dublji i uži. Ukoliko je nagib pištolja pogrešan može dovesti i do pojave naljepljivanja. [14]

Njihanje pištolja se prvenstveno koristi za premošćivanje većih zavora, za bolju popunu tj. veću količinu depozita te za dobivanje željenog izgleda završnog prolaza. Njihanjem se kontrolira talina i postižu željeni efekti zavarenog spoja. [14]

4.2. Prednosti i nedostaci MIG postupka zavarivanja

Svaki postupak zavarivanja pa tako i MIG ima svojih prednosti i nedostataka. Osnovne prednosti tih postupaka su: [14]

- primjenjivi su za zavarivanje svih vrsta metala,
- omogućavaju veliki izbor parametara zavarivanja te način prijenosa metala,
- moguće je zavarivanje u svim položajima,
- mogućnost zavarivanja u radionici i na terenu,
- mogućnost primjene različitih plinskih mješavina da bi se zadovoljili točno određeni zahtjevi materijala koji se zavaruje,
- široki raspon debljina dodatnog materijala,
- velika učinkovitost i proizvodnost,
- mogućnost automatizacije i robotizacije.

Nakon svake prednosti dolaze nedostaci koje taj postupak ima. Neki od nedostataka su direktna posljedica nepažnje. Nedostaci koji se javljaju su sljedeći: [14]

- veliki nedostatak je mogućnost nastajanja grešaka na terenu zbog loše zaštite od vjetra koji bi mogao otpuhati zaštitne plinove,
- javljaju se problemi kod dovođenja žice do sapnice jer ako je žica od mekanijeg materijala ima afinitet prema gužvanju te se otežano transportira do sapnice,
- mogućnost podešavanja velikog broja parametara je prednost, no ujedno predstavlja problem kod nestručnog rukovanja jer može dovesti do velikog broja grešaka od kojih su najčešće naljepljivanje i poroznost,
- štrcanje kod zavarivanja kratkim spojevima je bitan nedostatak jer izaziva dodatne troškove, ali i smanjuje mehanička i korozijska svojstva osnovnog materijala. Potrebno je poduzeti naknadnu obradu zavarenog spoja što je skup proces.

4.3. MIG zavarivanje aluminijских legura

Kod zavarivanja aluminijских legura najčešće upotrebljavani postupak je MIG. Taj postupak ima prednost nad nekim drugim zbog svoje brzine, a uz brzinu daje zadovoljavajuću kvalitetu zavarenog spoja. Kod zavarivanja elektrolučnim postupkom bitno je da svojstva zavarenog spoja budu barem jednaka ako ne i bolja od osnovnog materijala. Podvrsta MIG postupka je impulsno MIG zavarivanje koje koristi specifične parametre koji mu omogućuju brzo, pouzdano i točno zavarivanje aluminijских legura. Impulsno mig zavarivanje može biti ručno, mehanizirano, automatizirano i robotizirano, a u praksi je najprimjenjivnije ručno vođeni poluautomatizirani MIG postupak.[15]

4.3.1. Određivanje osnovnih parametara impulsnog MIG zavarivanja

Kod impulsnog MIG zavarivanja osobitu pozornost treba posvetiti osnovnoj struji. Ona mora biti tako odabrana da nakon što dođe do prestanka impulsa strujni krug bude i dalje neprekinut tj. da se ne prekine električni luk. Područje vrijednosti osnovne struje je između 40 i 50 A. Trajanje impulsa namješta se tako da u jednom impulsu se odvoji jedna kapljica rastaljenog materijala jer se u suprotnom može dogoditi da u jednom impulsu poleti više kapljica što bi izazvalo prskanje. Frekvencija impulsa proizlazi iz prethodna dva parametra, a kod aluminijских materijala najčešće korištena frekvencija je od 100 Hz. [16]

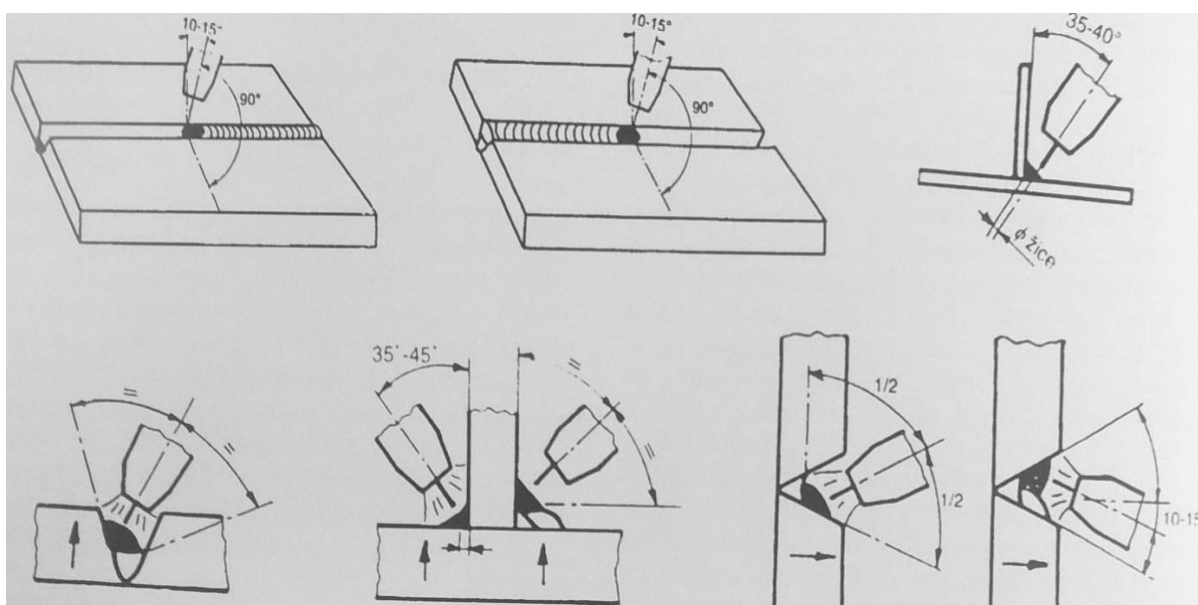
4.3.2. Duljina slobodnog kraja žice

Prilikom zavarivanja aluminijских legura potrebno je osigurati da slobodan kraj žice bude malo duži čime se smanjuje dovodenje vodika u talinu zavarenog spoja. Zbog dužeg slobodnog kraja žice otpor prolasku struje kroz žicu se povećava što ima za posljedicu povećanje temperature žice koja ima pozitivan značaj jer tako isparava veći dio vlage koja se nakupila u oksidnom sloju na žici. [16]

4.3.3. Tehnike rada

Kod svih vrsta zavarivanja pa tako i kod impulsnog MIG zavarivanja postoje dvije tehnike rada, a to su lijeva i desna tehnika. Ovisno o debljini aluminijskih materijala određujemo koja od tih tehnika je povoljnija za upotrijebiti. Tako kod debljih materijala povoljnije je upotrijebiti desnu tehniku zavarivanja jer se njome postiže bolje čišćenje oksida, veće protaljivanje i bolja zaštita procesa zavarivanja. Kod tankih materijala povoljnije je zavarivanje lijevom tehnikom jer se dobiva manje protaljivanje te je ljepši površinski izgled zavarenog spoja.[16]

Na slici 9. prikazani su neki od slučajeva u kojima se vrši zavarivanje aluminijskih legura te nagib pištolja u tim slučajevima.



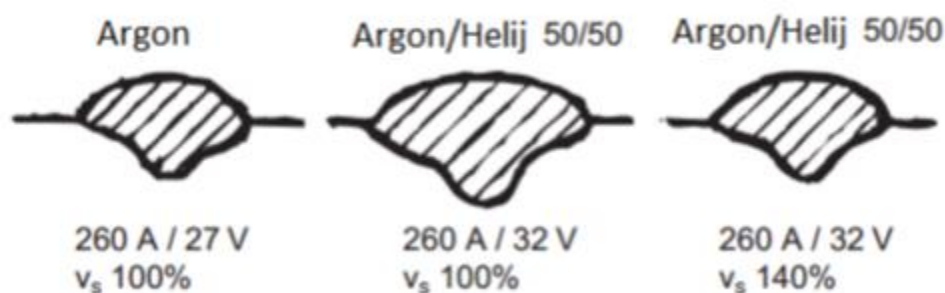
Slika 9. Nagib pištolja kod zavarivanja aluminijskih legura [16]

Zbog preglednosti tijekom zavarivanja pištolj se drži pod kutom od 10-15 °neutralne okomite osi kao što se može vidjeti na prethodnoj slici. Upotrebljavajući nagib pištolja električni luk se usmjerava tako da dobro zagrijava i tali osnovni materijal, da mlaz kapljica rastaljenog dodatnog materijala bude pravilno usmjeren te da se silama pravilno pridržava talina. Kada bi došlo do prevelikog nagiba pištolja tokom zavarivanja znatno bi se smanjila zaštita zavarenog spoja te bi se povećala mogućnost pojave poroznosti. Zbog nepovoljnog strujanja zaštitnog plina koje se javlja kod nepravilnog nagiba može doći do uvlačenja okolnog zraka u zaštitnu atmosferu što ima negativne posljedice na proces zavarivanja.

4.3.4. Izbor vrste i količine zaštitnog plina

Za odabir zaštitnog plina kod aluminijskih materijala najčešće se odabire argon čistoće 99,96 %. Argon se odabire jer je njegovim korištenjem moguća uspostava električnog luka bez rasprskavanja. Zbog niske toplinske vodljivosti argona šav u gornjem dijelu zavarenog spoja bude širok, a u donjem dijelu ostaje uzak. S druge strane moguće je još korištenje helija. Kod helija šav zavarenog spoja ostaje širok i dobiva se bolja penetracija. Kod MIG zavarivanja upotreba čistog helija nije česta i više se prakticiraju mješavine s udjelom od 30 do 70 %. Udio helija u zaštitnom plinu ovisi o potrebi za penetracijom. Kod tanjih materijala nema potrebe za velikom penetracijom pa je udio helija manji, a njegova svojstva (veći toplinski kapacitet i niža toplinska provodljivost u odnosu na argon) omogućavaju veću brzinu zavarivanja, a samim time i veću produktivnost. [16]

Na slici 10. prikazani su primjeri zavarenog spoja u presjeku gdje se može vidjeti oblik zavarenog spoja i dubina penetracije. Vidljivo je da za iste parametre zavareni spoj napravljen u zaštitnoj atmosferi argona i u mješavini zaštitne atmosfere argona i helija nema istu širinu i dubinu zavarivanja. Tek kada se brzina zavarivanja poveća za 40 % dobivaju se približno jednake vrijednosti zavarenog spoja. Takvo povećanje brzine zavarivanja za 40 % ujedno znači i povećanje produktivnosti za veliki udio što u krajnjem računu donosi više zarade i optimalnu proizvodnju.



Slika 10. Primjer zavarenog spoja s različitim parametrima [17]

4.4. Odabir dodatnog materijala

Kod odabira dodatnog materijala potrebno je posvetiti iznimnu pozornost na pravilno biranje materijala kojim će se zavarivati.

Da bi se pristupilo odabiru dodatnog materijala potrebno je prvo odrediti osnovni materijal i debljinu osnovnog materijala, odrediti postupak zavarivanja, vrstu spoja te definirati zahtjeve na zavareni spoj. Zahtjevi koje je potrebno definirati mogu se podijeliti na sljedeće skupine:[27]

1. Otpornost na pojavu pukotina,
2. Zahtjev na čvrstoću i duktilnost,
3. Zahtjev na korozijsku otpornost,
4. Svojstva materijala na povišenim temperaturama.

Kod odabira dodatnog materijala za zavarivanje aluminijskih legura bitno je za napomenuti kako često se odabire dodatni materijal koji nema ista svojstva kao i osnovni materijal. Kada se odabire takav dodatni materijal s različitim svojstvima potrebno je izabrati materijal koji ima bolja svojstva i koji će podići svojstva zavarenog spoja tako da mu poboljša čvrstoću, otpornost na pojavu pukotina, otpornost na pojavu korozije te statičku izdržljivost.[28]

MIG postupak zavarivanja koristi za dodatni materijal žicu namotanu na kolut. Ta žica je ujedno i anoda u električnom luku. Promjeri koji se koriste ovise o potrebi za depozitom i o debljini osnovnog materijala, a mogu biti od 0,8 mm do 3,2 mm. Dodatni materijal kao i kod svakog drugog postupka potrebno je čuvati u suhim i čistim uvjetima. Kod aluminijskih legura to čuvanje ima značajnu ulogu jer aluminij stvara zaštitni oksidni sloj na svojoj površini koji je lako apsorbira vlagu pa dolazi do pojave poroznosti prilikom zavarivanja.[28]

Na temelju do sada iznesenih činjenica odabire se dodatni materijal, no kako bi se postupak odabira ubrzao i da ne bi svaki put trebalo prolaziti kroz sva ograničenja, napravljena je tablica pomoću koje se olakšano može doći do dodatnih materijala kojima je moguće zavarivanje određenog osnovnog materijala. Tablica je prikazana na slici 11. Na slici 11 je vidljivo da za zavarivanje osnovnog materijala EN AW 5757 koji se koristi u eksperimentalnom dijelu mogu se koristiti tri dodatna materijala, a na temelju iskustva i na temelju mogućnosti tvrtke koja vrši zavarivanja izabran je dodatni materijal Al 5356.

[illegible]

Slika 11. Odabir dodatnog materijala [29]

Na slici 12. prikazan je certifikat tvrtke koja prodaje dodatni materijal kojim se potvrđuju kemijska i mehanička svojstva dodatnog materijala, a na slici 13. prikazan je barkod i podaci sa pakovanja dodatnog materijala na kojima se može vidjeti serija dodatnog materijala.

AIR LIQUIDE WELDING FRANCE
25, Boulevard de la Paix
CS30003 Cergy Saint Christophe

Phone: +33134213333
Fax: +33134213130

Pagina 1 di 1



Certificato di Prodotto / Product Certificate

Certificato N°: Certificate n°: ALW00163196-1	Ordine N°: Order n°:	Bolla N°: Delivery Note n°:	Cliente: Customer: SUMMA-CHEM D.O.O. KASINCI, 1 ODVOJAK 1
Data: Date: 17/10/2016	Quantità: Quantity:	UM: Unit: KG	10257 BREZOVICA - CROAZIA CROATIA
Designazione: Trade name:	W000283225 ALUFIL AIMg5 1.2X0007XBS300XP	Lotto N°: / Batch n°: 129-53M13916	
Classificazione: Classification:	EN ISO 18273: S Al 5356 (AlMg5) AWS A5.10: ER5356		

Si confermano le proprietà sotto riportate per i consumabili di saldatura da noi forniti

We confirm following properties for the welding filler metals delivered by us

Analisi chimica prodotto / Product chemical analysis (%):

In accordo a / According to EN 10204-3.1

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Be	
0.036	0.099	0.0036	0.141	4.87	0.128	0.005	0.1	0.0002	

Proprietà meccaniche del deposito / Weld metal mechanical properties:

In accordo a / According to EN 10204-2.2

Trattamento Termico Heat treatment	Test temp. °C	Snervamento Yield Strength ReH [N/mm²]	Trazione Tensile Strength Rm [N/mm²]	Allungamento Elongation A [%]	Durezza Hardness HB	Resilienza - Impact strength (Charpy-V)		
						Temp: °C	Joule	Media Average
Come Saldato as Welded	20	115	250	19				

Note: Al resto (remainder)

Remarks:

This certificate is printed by computer and needs no signature

Emesso da - issued by: Brentegani Roberto

Questo certificato è stato stampato da computer e non necessita di firma

Bellini Jacopo

Quality Departement - Verona Unit

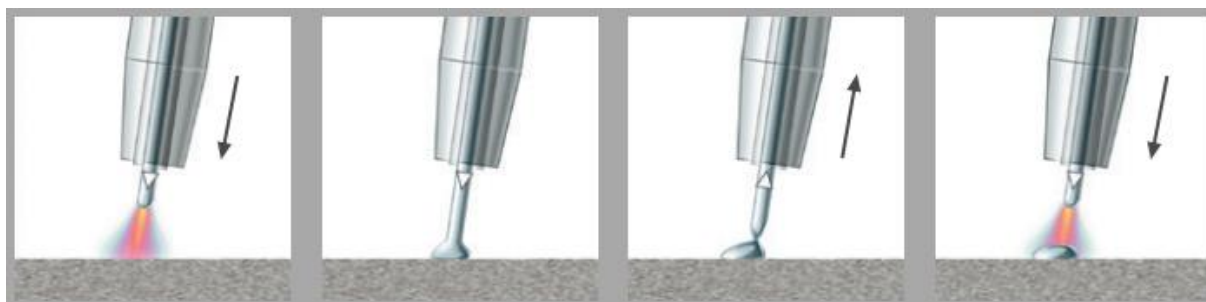
Slika 12. Certifikat tvrtke [24]



Slika 13. Barkod sa pakovanja [24]

4.5. CMT postupak zavarivanja

CMT (Cold Metal Transfer) postupak zavarivanja je postupak zavarivanja koji je razvijen kako bi se udovoljilo visokim standardima proizvodnje. Naime zavarivanjem se unosi velika količina topline u osnovni materijal što uvelike smanjuje svojstva samog materijala. Zbog toga je razvijen CMT postupak kako mu samo ime govori postupak hladnog prijenosa materijala. Taj hladni prijenos je samo figurativan, a označava prijenos materijala uz podosta smanjen unos topline u osnovni materijal. Postupak funkcionira na principu koji je prikazan na slici 14. Vidljivo je da u prvom koraku samog postupka se uspostavlja električni luk te motor koji dodaje žicu počinje s radom i žica dolazi sve bliže osnovnom materijalu. Nakon što je žica dovoljno blizu osnovnom materijalu i nakon što se formirala talina na kraju žice i na osnovnom materijalu, prekida se dovod struje i isključuje se električni luk. U tom trenutku kraj žice s talinom udara u osnovni materijal, a motor za dodavanje žice počinje uvlačiti žicu u pištolj. Zbog te promjene smjera kretanja žice talina ostaje na osnovnom materijalu, a ostatak žice se vraća u položaj u kojem se ponovo uspostavlja električni luk i cijeli proces kreće ispočetka.



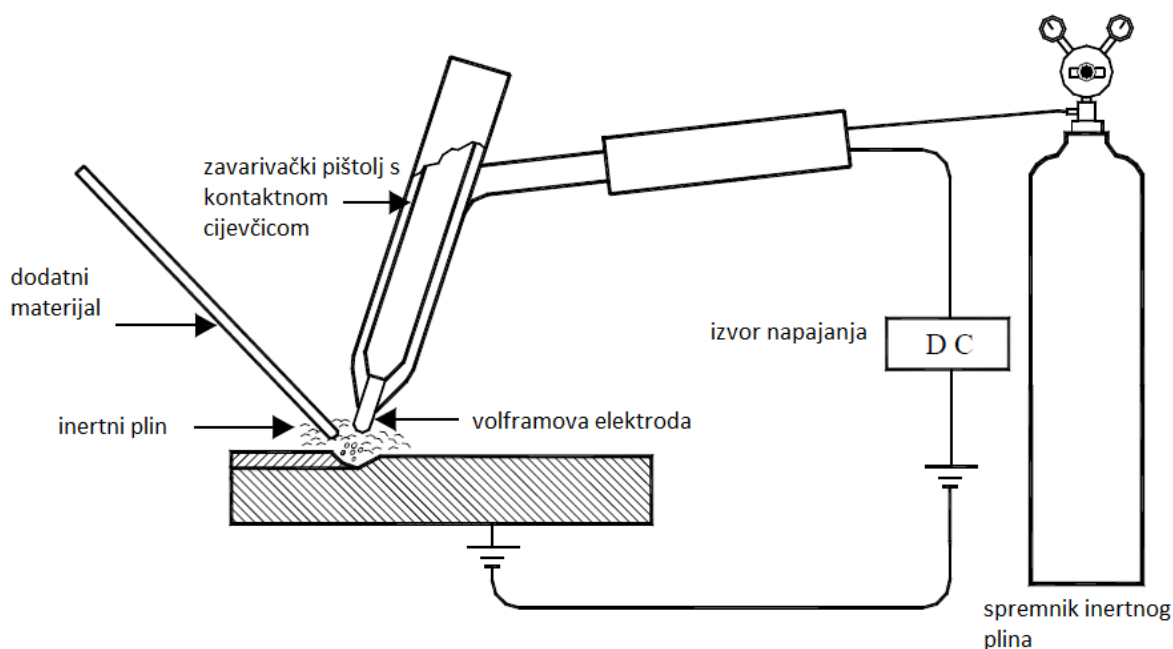
Slika 14. CMT postupak zavarivanja [26]

CMT postupak zavarivanja ima niz prednosti koje su direktna posljedica smanjenog unosa topline. Zbog smanjenih temperatura koje se razvijaju u električnom luku povećava se preciznost postupka, dolazi do manjih deformacija u materijalu, smanjuje se prskanje prilikom zavarivanja, te se dobiju puno bolja mehanička svojstva u području zone utjecaja topline. Zbog tih prednosti CMT postupak je pogodan za zavarivanje tanjih materijala i materijala osjetljivih na povećan unos topline poput aluminija i aluminijskih legura.

5. TIG POSTUPAK ZAVARIVANJA

TIG (engl. Tungsten Inert Gas) postupak zavarivanja je elektrolučni postupak zavarivanja gdje se toplinom, oslobođenom u električnom luku koji se uspostavlja između osnovnog materijala i elektrode od volframa, tali osnovni materijal i po potrebi dodatni materijal te tako nastaje zavareni spoj. Cijeli proces zavarivanja štiti se dovođenjem zaštitne atmosfere u obliku inertnog plina koji se upuhuje u područje zavarivanja. [18]

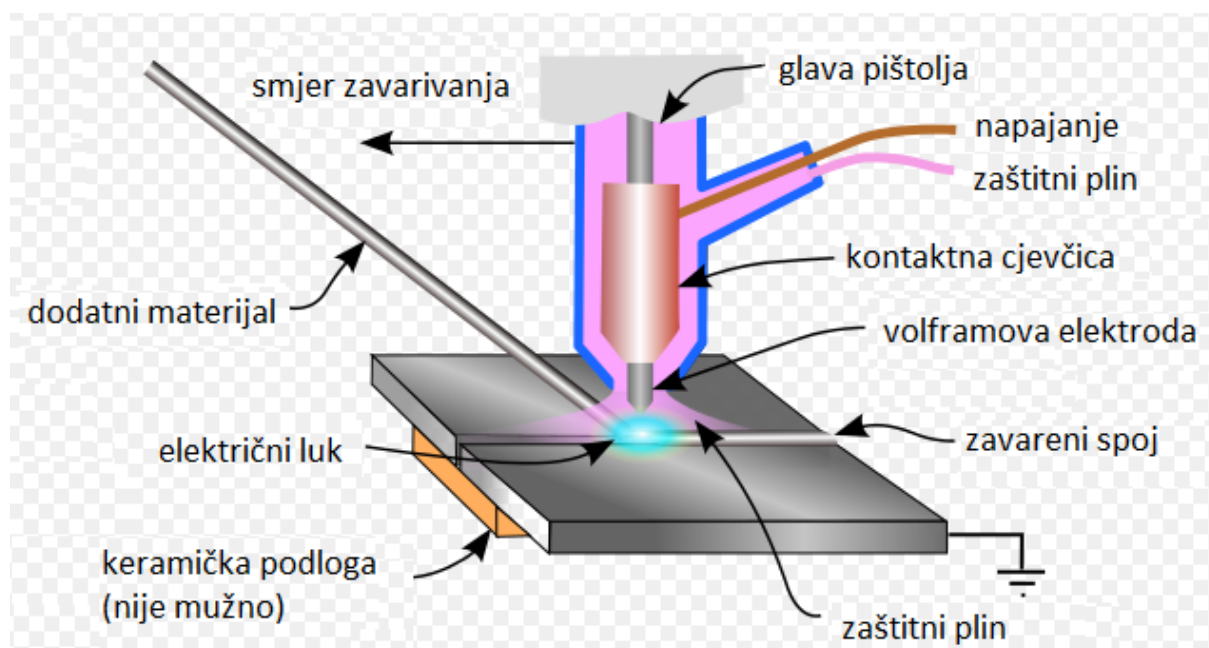
Na slici 15. prikazan je shematski prikaz TIG postupka zavarivanja sa svim glavnim dijelovima koji su potrebni da bi se izvršio proces zavarivanja.



TIG zavarivanje većinom se koristi kao ručni postupak zavarivanja no može se automatizirati i poluautomatizirati. Robotizacija ovog postupka bila bi prezahtjevna i bilo bi teško pa i gotovo nemoguće postići zadovoljavajuće kriterije zavarenog spoja te je trenutno robotizacija neisplativa. Postupak funkcionira na sljedeći način. Električna struja se dovodi kabelom s izvora napajanja na pištolj i na kontaktnu cjevčicu na koju je pričvršćena volframova elektroda. Struja koja dolazi na volframovu elektrodu visoke je frekvencije. Istovremeno prije početka zavarivanja dovodi se zaštitni plin iz čelične boce gumenim crijevom do pištolja za zavarivanje, a zatim se putem sapnice u pištolju taj plin usmjerava na mjesto zavarivanja. Za ručno TIG zavarivanje potrebne su obje ruke jer u jednoj ruci zavarivač drži pištolj za zavarivanje, a u drugoj žicu dodatnog materijala koju zatim dodaje u talinu zavarenog spoja. Da bi proces

zavarivanja počeo zavarivač pritiskom prekidača pušta struju na volframovu elektrodu i zaštitne plinove kroz sapnicu te približava pištolj i elektrodu na udaljenost od 2 do 5 mm od osnovnog materijala. Na toj udaljenosti od osnovnog materijala uspostavlja se električni luk koji tali osnovni materijal. Rastaljeni osnovni materijal sam po sebi formira zavareni spoj nakon hlađenja, no ako je potrebno u njega se dodaje dodatni materijal u obliku žice koji se rastali u talini i zajedno s osnovnim materijalom formira zavareni spoj. Za uspješno zavarivanje zavarivač pomoću pištolj u jednom smjeru na pripremljenom spoju i tako tali još osnovnog materijala i formira zavareni spoj. Za prestanak zavarivanja dovoljno je otpustiti prekidač na pištolju za zavarivanje i prekida se strujni krug i dovod zaštitnog plina. Bitno kod prestanka zavarivanja je da se pištolj za zavarivanje još koju sekundu drži iznad zavarenog spoja jer prekidanjem strujnog kruga ne prekida se dovod zaštitnog plina u istom trenutku nego zaštitni plin još koju sekundu struji kako bi omogućio zaštitu zavarenog spoja sve dok se ne formira i djelomično ohladi. [3]

Na slici 16. prikazan je shematski prikaz samog postupka zavarivanja te su nabrojani osnovni dijelovi koji su potrebni da se proces izvrši.



Slika 16. Shematski prikaz TIG procesa zavarivanja [20]

Kod poluautomatskog TIG zavarivanja osnovni princip se ne mijenja jedina promjena vezana je uz dodavanje dodatnog materijala. Naime kod poluautomatskog TIG zavarivanja pritiskom

na prekidač uključuju se struja i zaštitni plin no i motor koji pokreće automatsko dodavanje žice dodatnog materijala.

Kod TIG zavarivanja oblik struje značajno utječe na zavarivanje. Ovisno o vrsti materijala mogu se koristiti istosmjerni izvori napajanja, izmjenični izvori ili kombinacija te dvije vrste. Ručno TIG zavarivanje zahtjeva korištenje izvora sa strmom padajućom statičkom karakteristikom kako bi se osigurala približno konstantna struja zavarivanja. To je zbog toga jer kod ručnog TIG zavarivanja zavarivač ne može držati cijelo vrijeme istu udaljenost pištolja od materijala i dolazi do razlike u visini električnog luka. Ta razlika kod neke druge karakteristike značila bi promjenu struje zavarivanja što bi moglo dovesti do grešaka u zavarivanju poput naljepljivanja i nedovoljnog protaljivanja. Kod mehaniziranog zavarivanja mogu se koristiti i drugi izvori s ravnom statičkom karakteristikom jer u mehaniziranom zavarivanju duljina električnog luka je konstantna. [3]

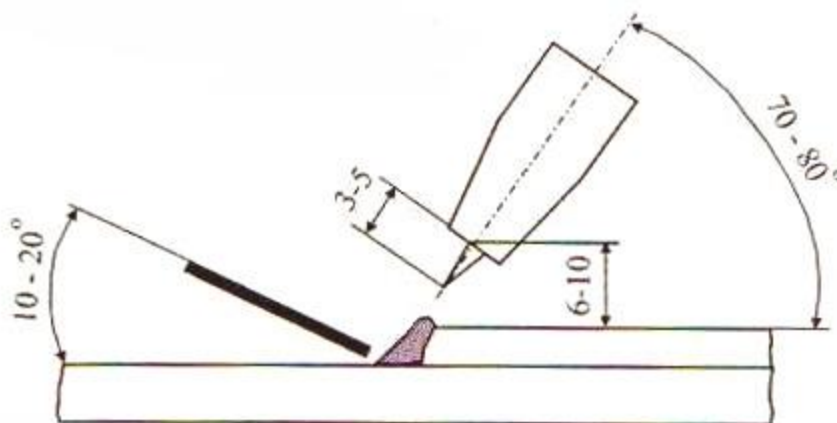
Kako je TIG postupak zavarivanja bezkontaktni postupak, za razliku od MIG/MAG postupka ili REL (ručno elektrolučno zavarivanje) postupka, potrebni su uređaji koji su opremljeni dodatnim visokofrekventnim generatorima koji omogućuju početnu ionizaciju te lakše uspostavljanje električnog luka. [3]

Noviji TIG uređaji opremljeni su tehnologijom koja im omogućava impulsno zavarivanje. Takvi uređaji imaju niz prednosti nad starijim jer pružaju mnogo prednosti u pogledu zavarivanja tanjih materijala te omogućuju lakše zavarivanje u prisilnim položajima. Korištenjem impulsa može se dobiti količina taline koja nam odgovara jer trajanjem i amplitudom impulsa osigurava se taljenje osnovnog materijala baš onoliko koliko je potrebno. Prednosti koje pruža impulsno TIG zavarivanje u odnosu na klasično su stabilniji luk, šire područje izbora parametara zavarivanja, precizna kontrola penetracije, manja količina taline zavarenog spoja i sprječavanje akumulacije oksida na površini. Zbog manjeg unosa topline u osnovni materijal dolazi do smanjenih deformacija materijala i manjeg utjecaja na veličinu zrna što znači da dobivamo zavareni spoj s boljim mehaničkim svojstvima. [3]

Iako su novi postupci i strojevi omogućili bolje i brže zavarivanje, potrebno je za napomenuti da oni isto tako zahtijevaju usku skupinu unesenih parametara i da najmanje promjene u parametrima mogu uzrokovati nastanak grešaka stoga je potrebno školovanje i redovito usavršavanje zavarivača koji rukuju tim aparatima.

5.1. Tehnika rada kod TIG zavarivanja

Na slici 17. prikazani je položaj pištolja za zavarivanje i dodatnog materijala kod TIG zavarivanja.



Slika 17. Položaj pištolja i dodatnog materijala kod TIG zavarivanja[3]

Proučavajući tehniku TIG zavarivanja vidi se da je ona veoma slična tehnici plinskog zavarivanja. Položaj pištolja je blago nagnut i tako se drži sve dok se rubovi ne rastale. Nakon što nastane talina osnovnog materijala u nju se dodaje žica i rastaljuje se potrebna količina te žice. Kod strujnih opterećenja iznad 150 A pištolj se hladi vodom.

TIG zavarivanje omogućava najbolje praćenje procesa taljenja zato jer se u tom procesu zavarivanja može odvojiti dovođenje dodatnog materijala od dovođenja topline što rezultira najboljom kvalitetom korijenskih zavarenih spojeva.

Kod zavarivanja u vodoravnom položaju može se raditi sa ili bez dodatnog materijala, to ovisi o pripremljenosti površine za zavarivanje i debljini materijala. Ukoliko se zavaruje bez dodatnog materijala to moraju biti veoma male debljine materijala i fino obrađene tako da imaju mali međusobni procjep. Ukoliko se zavaruje s dodatnim materijalom on se uvodi direktno u talinu i to pod kutom od 10 do 20 ° u odnosu na vodoravnu os dok je nagib pištolja za zavarivanje pod kutom od 70 do 80 ° u odnosu na vodoravnu os. Kod zavarivanja sučeljenih okomitih spojeva pištolj se drži pod kutom od 90 ° naspram okomitoj ravnini. Zavarivanje se vrši tako da se pištolj povlači ravno sa zavarenim spojem, a dodatni materijal se dodaje s gornje strane.

5.2. Prednosti i nedostaci TIG zavarivanja

Glavna prednost TIG postupka zavarivanja je dobivanje iznimno kvalitetnih zavarenih spojeva. Uspoređujući s ostalim metodama zavarivanja TIG postupak daje najkvalitetnije zavarene spojeve. Osim kvalitetnih zavarenih spojeva TIG postupak ima još niz prednosti. Tim postupkom moguće je zavarivati sve metale, mogućnost zavarivanja u svim položajima (vodoravno, okomito i nadglavno zavarivanje), mogućnost zavarivanja svih vrsta radnih komada. Kod TIG postupka zavarivanja ne dolazi do rasprskavanja kapljica dodatnog materijala jer se dodatni materijal ubacuje direktno u talinu. Nema naknadnih troškova čišćenja zavarenog spoja kao što je čišćenje troske i uklanjanje dima iz radnog prostora. Zavareni spojevi su lijepog glatkog izgleda i estetski veoma prihvatljivi. Osim što su estetski prihvatljivi takvi glatki i čisti zavareni spojevi puno su otporniji na koroziju i nisu potrebna dodatna brušenja da bi se na njih nanio zaštitni premaz ukoliko je potreban. Sve te činjenice pojeftinjuju i poboljšavaju proizvodni proces.

Osim prednosti TIG postupak ima i nekoliko mana. Najveća njegova mana je neekonomičnost kod većih debljina osnovnog materijala. Naime taj postupak je veoma spor u usporedbi s MIG/MAG postupkom te samim time postaje slabo produktivan. Kod većih debljina potrebno je više prolaza za zavarivanje jednog spoja, a uzimajući u obzir brzinu zavarivanja i manju penetraciju dolazi se do spoznaje da je neekonomičan. Još jedan nedostatak otežava njegovu primjenu na otvorenom, a to je strujanje zraka. Osjetljiv je na strujanje zraka, tj. vjetar. Vjetar lako može otpuhati zaštitnu atmosferu i tako prouzročiti smanjenje kvalitete zavarivanja. Da bi se takvo što spriječilo potrebno je u terenskim uvjetima zavarivanja izgraditi zaklon od vjetra što dodatno usporava proces i povećava cijenu zavarivanja. I posljednji nedostatak je da zahtjeva kvalitetnu pripremu mjesta zavarivanja. Za zavarivanje kvalitetnih zavarenih spojeva zahtjeva veliku čistoću i preciznost u pripremi zavarenog spoja što dodatno poskupljuje proizvodnju.

5.3. Parametri TIG postupka zavarivanja

Temeljni parametar TIG postupka je jakost struje. Ona se određuje prema vrsti i debljini osnovnog materijala. Debljina osnovnog materijala također određuje način pripreme spoja za zavarivanje. TIG postupak raspolaže sa strujama jakosti od 40 do 400 A. Zavarivanje

sučeljenog spoja kod aluminijskih legura zahtjeva struje od oko 45 A po milimetru debljine lima. [3]

Da bi započeli postupak zavarivanja prvo je potrebno ispitati unesene parametre na pomoćnoj bakrenoj pločici. Iako to nije obavezno to je svakako preporučljivo da se nepotrebno ne uništava mjesto zavarivanja ako parametri nisu dobri, a ujedno se i osuši pištolj i elektroda od eventualne vlage. Nakon uspostavljanja električnog luka potrebno je početno mjesto dobro pretaliti prije dodavanja dodatnog materijala. Kod suvremenih uređaja postoji mogućnost postupnog smanjenje struje nakon uspostavljanja električnog luka. Prilikom završetka zavarivanja i prekidanja električnog luka potrebno je pištolj ostaviti još 3 do 10 s na mjestu završetka zbog zaštite zavarenog spoja.[3]

Kod TIG zavarivanja aluminijskih legura zavarivanje se provodi najčešće za debljine od 6 mm, jer sve iznad tih debljina izaziva gubitke u procesu i nije ekonomično.

Zavarivanje aluminijskih legura TIG postupkom ima svojih prednosti u usporedbi s drugim postupcima. TIG zavarivanje aluminijskih legura pruža dobru zaštitu taline argonom pa omogućuje veoma dobru kvalitetu zavarivanja, a direktno dodavanje žice u talinu omogućava kidanje oksidnog sloja koji se napravio i samim time ispuštanje plinova ako su se nakupili ispod oksida.

Priprema aluminijskih limova za zavarivanje vrši se na sljedeći način. Osim odmašćivanja i uklanjanja viška oksida potrebno je za određene debljine napraviti predpripremu. Za limove koji su debljine do 2 mm preporučuje se spoj s povijenim rubom. Takav spoj se kasnije pretaljuje bez dodatnog materijala. Limovi debljine od 2 do 4 mm zavaruju se I spojem bez međusobnog razmaka, a limovi debljine od 4 do 6 mm zavaruju se također s I spojem ali s međusobnim razmakom od 2 do 3 mm. Ukoliko se zbog potreba proizvodnje TIG postupkom zavaruju limovi debljine veće od 6 mm tada se prije zavarivanja priprema klasični V ili X spoj. Kod tako velikih debljina osnovnog materijala preporučljivo je i predgrijavanje do 150 °C koje smanjuje naglo odvođenje topline i eliminira negativan utjecaj vlage i nečistoća. Predgrijavanje također pomaže kod smanjenja vjerojatnosti za nastajanje poroznosti, ali smanjuje mehanička svojstva materijala u zoni utjecaja topline. [3]

5.3.1. Odabir dodatnog materijala i volframove elektrode

Zavarljivost aluminija i njegovih legura s Mn, Mg, Si i Zn je veoma dobra uz odgovarajući odabir dodatnog materijala. Kod odabira dodatnog materijala bitno je da bude iz iste skupine kao i osnovni, ali s nešto većim udjelom istih legirnih elemenata. Kod zavarivanja aluminijских legura s bakrom lako može doći do pojave pukotina jer bakar kao legirni element povećava tvrdoću zone taljenja. Također kod zavarivanja nije preporučljivo koristiti dodatni materijal od čistog aluminija jer i on izaziva nastajanje pukotina u zoni taljenja. [3]

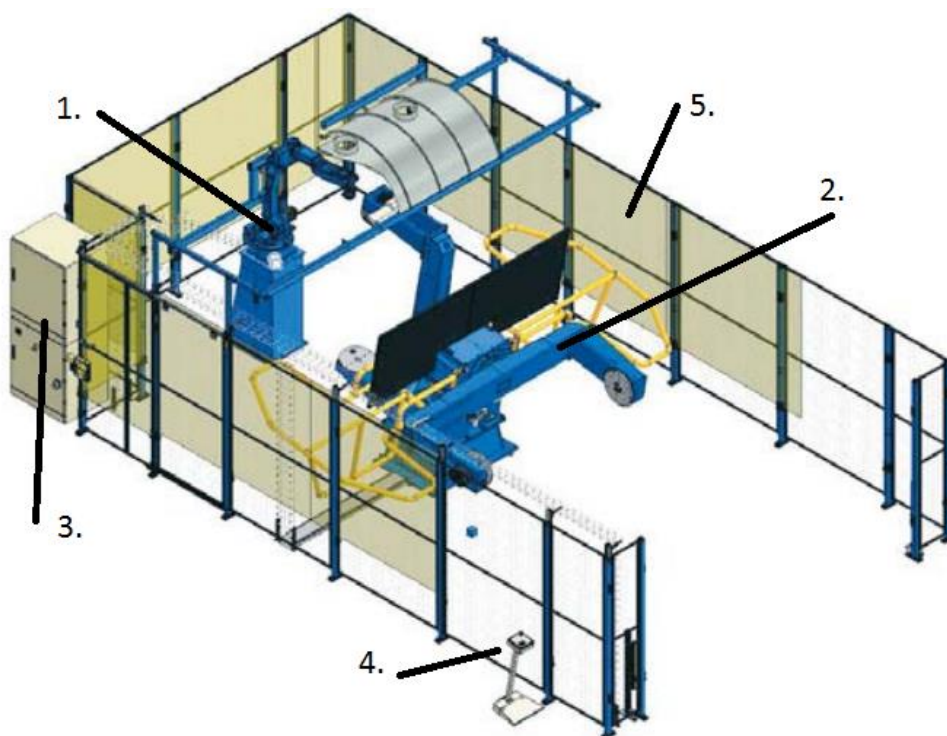
Volframova elektroda kod TIG postupka zavarivanja služi za uspostavljanje i održavanje električnog luka. Elektroda je izrađena od volframa s određenim udjelom legirnih elemenata kao što su torijev ili cirkonijev oksid. Ovi legirni elementi olakšavaju uspostavljanje električnog luka i stabiliziraju ga osobito kod malih struja. Dodavanjem legirnih elemenata smanjuje se erozija vrha elektrode te se povećava dozvoljeno strujno opterećenje. Elektrode za TIG zavarivanje se proizvode u promjerima od 0,5 do 8 mm, te duljine od 50 do 175 mm. Da bi elektroda uspješno zavarivala potrebno je prije zavarivanja brušenjem obraditi vrh elektrode na pravi oblik koji ovisi o vrsti struje za zavarivanje i njenoj veličini. Zadatak zaštitnog plina je da osigura prikladnu atmosferu koja se može lako ionizirati te zaštititi vrh elektrode i talinu od kontaminacije kisikom ili okolnom atmosferom. [21]

6. ROBOTSKA STANICA ZA ZAVARIVANJE

Robotizirano zavarivanje danas je sve rasprostranjenije u proizvodnji. Kako bi proizvod bio konkurentan na svjetskom tržištu mora zadovoljavati visoke standarde kvalitete ali po što nižoj cijeni. Zbog takvih zahtjeva na proizvodnju roboti se javljaju kao idealno rješenje takvog problema. Naime početno ulaganje za kupnju robota predstavlja veliki trošak, ali daljnje korištenje robotske stanice smanjuje troškove proizvodnje. Roboti su nakon programiranja i pravilnog namještanja parametara sposobni raditi potpuno samostalno i potreban im je operater jedino da kontrolira sam proces, tj. kvalitetu zavarenih spojeva te da učvršćuje obratke na mjesto zavarivanja. Jednom isprogramiran robot obavlja sve zavarivačke procese samostalno i u svim položajima skoro pa jednako kvalitetno, može raditi u više smjena jednako učinkovito te izvršavati one poslove koji bi za čovjeka bili monotoni ili opasni.

6.1. MOTOMAN ArcSistem VMF 500 S5D

Robotska stanica MOTOMAN ArcSistem VMF 500 S5D sastoji se od nekoliko glavnih dijelova. Ti dijelovi sinkronizirano funkcioniraju i omogućuju brže i produktivnije zavarivanje obradaka. Cijeli sustav je prikazan na slici 18.



Slika 18. Motoman zavarivački sustav [23]

Kao što je vidljivo na slici 18. sustav se sastoji od pet osnovnih dijelova koji su neophodni za cijeli proces. Ti dijelovi su:

1. Robotski manipulator,
2. Pozicioner,
3. Centralno računalo i napajanje zavarivačke stanice,
4. Sigurnosni sustav,
5. Zaštitna ograda.

Svaki od tih nabrojanih dijelova ima određenu funkciju koja omogućava proces zavarivanja. Prvi od tih dijelova je robotski manipulator ili robotska ruka. Robotska ruka služi za prihvatanje pištolja za zavarivanje te dovodjenje istog do mjesta zavarivanja. Nakon što je pištolj za zavarivanje na pravom položaju i nakon što proces zavarivanja počne robotska ruka ima zadatak voditi pištolj za zavarivanje u smjeru zavarivanja točno određenom brzinom i točno određenim nagibom koji je operater zadao. Ta mogućnost kontinuiranog zavarivanja daje visoku kvalitetu zavarenog spoja i povećanu produktivnost.

Pozicioner kao drugi nabrojani sklop ima zadaću namještanja predmeta koji se zavaruje u položaj koji odgovara robotskoj ruci. Taj sklop cijelom sustavu daje još dodatna tri stupnja slobode koja ubrzavaju proces i omogućuju zavarivanje dijelova raznolikih oblika. Pozicioner ujedno ima zadaću ubrzavanja procesa na još jedan način. Na slici je vidljivo kako se pozicioner sastoji od dva djela koja se mogu zakretati neovisno jedan o drugome. To svojstvo omogućava istovremeno zavarivanje i montiranje sljedećeg dijela. Naime dok se na jednoj strani dio zavaruje na drugoj strani operater može staviti novi obradak na mjesto i učvrstiti ga te tako smanjiti vrijeme stajanja između izmjene obradaka.

Centralno računalo i napajanje zavarivačke stanice ima glavnu funkciju u cijelom sustavu. Ono je zaduženo da cijeli sustav sinkronizira, da upravlja radom pojedinih dijelova sustava te da osigura potrebnu električnu energiju za pojedini dio u točno određenom trenutku.

Sigurnosni sustav je sustav niza senzora koji omogućuju sigurno zavarivanje i koji štite operatera od slučajnog ulaska u radni prostor robota gdje bi se mogle dogoditi ozljede. Također štiti robotsku ruku i pozicioner od predmeta koji bi se igrom slučaja mogli naći u radnom prostoru i prouzročiti neki kvar cijelog sustava.

Zaštitna ograda je niz pregrada koje okružuju zavarivačku stanicu te na taj način osiguravaju i označavaju radni prostor koji je potreban za nesmetano funkcioniranje sustava. Još je jedna

bitna zadaća zaštitne ograde, a to je da štiti radnike koji bi se mogli naći u blizini od štetnih ultraljubičastih zraka koje se emitiraju prilikom zavarivanja, te od štrcanja dodatnog materijala prilikom samog zavarivanja.

Na slici 19. i 20. prikazana je zavarivačka stanica u realnim uvjetima te sa dodatnom opremom koja je potrebna za proces zavarivanja, a koja ne ulazi u osnovne dijelove stanice jer ju svaki od korisnika može prilagoditi prema svojim potrebama.



Slika 19. Radni prostor zavarivačke stanice [24]

U radnom prostoru zavarivačke stanice poželjno je da se nalazi što manje stvari koje bi mogle kompromitirati zavarivački proces.



Slika 20. Robotska ruka i uređaji za zavarivanje [24]

Na slici 20. vidljiv je drugi dio radnog prostora s robotskom rukom i dvije zavarivačke stanice. Bez tih stanica proces zavarivanja ne bi bio moguć jer se preko tih stanica određuje postupak zavarivanja. Iako one određuju proces zavarivanja one ne spadaju u osnovne dijelove sustava jer svaku od tih stanica odabire i instalira krajnji korisnik prema svojim potrebama. Konkretno ove dvije su ovdje zbog toga jer se na ovom sustavu vrši zavarivanje aluminijskih legura i visokolegiranih čelika pa je svaka od tih stanica namještena za zavarivanje određene vrste materijala.

6.2. Uređaj za zavarivanje

Kod zavarivanja ispitnih uzoraka korišten je u sklopu robotske stanice uređaj tvrtke Fronius, TransPuls Synergic 4000. To je inverterski uređaj za impulsno i klasično MIG/MAG zavarivanje. Osim MIG/MAG zavarivanja moguć je još niz postupaka koji se mogu primijeniti

pomoću tog uređaja poput REL zavarivanja, lotanja i žljebljenja. Područje zavarivanja mu je od 3 do 400 A, uz napon od 14,2 do 34V. Intermitencija uređaja iznosi 40% na 400A, 60% na 365A i 100% na 320A. Izgled uređaja prikazan je na slici 21.



Slika 21. Uređaj za zavarivanje Fronius FK 4000-R [30]

Na slici 22. prikazana je identifikacijska pločica uređaja.



Slika 22. Identifikacijska pločica uređaja [24]

7. EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom dijelu bilo je potrebno odrediti tehnologiju zavarivanja te optimizirati parametre zavarivanja koji bi dali najveću produktivnost uz zadovoljavanje svih svojstava koja su propisana normom HRN EN ISO 15614-2 za aluminijske materijale.

Zavarivanje ispitnih uzoraka i predobrada osnovnog materijala izvršena je u Đuri Đakoviću u Slavonskom Brodu, odjel Specijalna vozila d.d. Izrezivanje i ispitivanje uzoraka provedeno je u Laboratoriju za zavarivanje na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu.

7.1. Predobrada uzoraka

Prije početka zavarivanja potrebno je ploče osnovnog materijala pripremiti za zavarivanje. Predpriprema izvršena je u Specijalnim vozilima u Slavonskom Brodu. Prvo se obavlja izrezivanje testnih ploča koje je obavljeno pomoću laserskog uređaja TruLaser 3060. To je laserski uređaj za rezanje kojim je moguće rezati sve nekoliko vrsta materijala. Obične čelike debljina do 20mm, a inox čelike i aluminijske legure do 15mm. Uređaj kojim su se rezale ploče prikazan je na slici 23.



Slika 23. TruLaser 3060 [24]

Nakon izrezivanja vrši se predobrada kosina na pločama kako bi bilo moguće zavarivanje istih. Predobrada kosina izvršena je pomoću portalne glodalice Forest-Line koja je prikazana na slici 24. Glodalica je starije i robusnije izrade no koristi se i dalje u pogonu zbog svojih sposobnosti obrade velikih komada te zbog zadovoljavajuće preciznosti.



Slika 24. Portalna glodalica Forest-Line [24]

Obradene ploče nakon predobrade potrebno je još prije zavarivanja međusobno spojiti i učvrstiti u stezne naprave koje se nalaze na pozicioneru prikazanom na slici 19. Izgled spojenih i stegnutih ploča prije samog zavarivanja prikazan je na slici 25. Nakon što je sve pripremljeno kreće se s programiranjem robota te se vrši zavarivanje ploča. Na slici 25. prikazan je i početak zavarivanja te pozicija robotske ruke kod zavarivanja. Bitno je obratiti pozornost na nagib pištolja kod zavarivanja gdje se može primijetiti kako nagib konstantno iznosi 10 do 15° što osigurava kvalitetu zavarenog spoja, a što je iznimno teško postići zavarivaču koji zavaruje ručnim načinom rada.

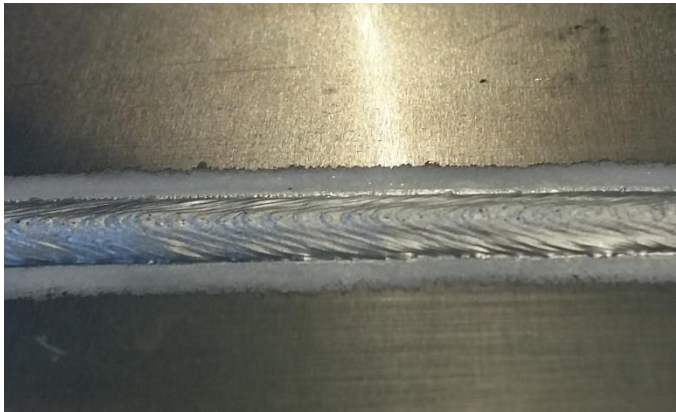







Slika 25. Početak zavarivanja [24]

Rezultati zavarivanja prikazani su u tablici 7. gdje su ujedno i razvrstani uzorci koji će se pripremiti za ispitivanje prema normi HRN EN ISO 15614-2. Uzorci koji će se pripremiti za testiranje prema normi odabrani su između nekoliko uzoraka i to promišljenim izborom kako bi se došlo do važnih zaključaka vezanih za optimizaciju postupka. Za svaki od uzoraka izrađen je WPS (Welding Procedure Specification) kako bi se znali parametri i uvjeti zavarivanja. WPS sadrži sve podatke koji su značajni kod zavarivanja i osnovna je dokumentacija u tvrtkama kada je u pitanju zavareni spoj. WPS izrađuje inženjer koji je zadužen za proces zavarivanja i svojim potpisom odgovara za taj zavareni spoj. Bitan značaj WPS-a je u tome da sadrži sve bitne značajke postupka pa je zbog toga olakšano razumijevanje cijelog postupka osobama koje nakon zavarivanja ispituju zavareni spoj. Za zavarivanje korišten je dodatni materijal ALUFIL AlMg5 opisan u poglavlju 4.4. te zaštitni plin 100% argon.

Na u tablici 7. uzorci su numerirani prema redoslijedu zavarivanja te su slikama prikazane dvije strane zavarenog spoja. U tablici 7. vide se slike lica zavarenog spoja i korijena zavarenog spoja. Kod kutnih zavarenih spojeva u tablici 8. nije prikazan korijen zavarenog spoja jer se on ne vidi tj. korijen je unutar materijala.

Tablica 7. Rezultati zavarivanja

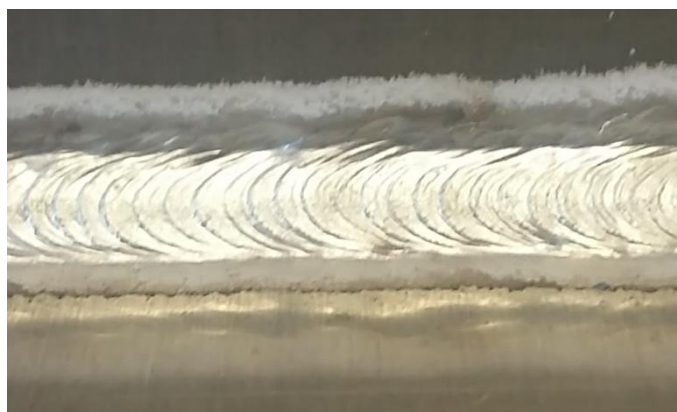
Lice zavarenog spoja	Korijen zavarenog spoja
	
Uzorak 1	Uzorak 1
	
Uzorak 2	Uzorak 2
	
Uzorak 3	Uzorak 3



Uzorak 10



Uzorak 10


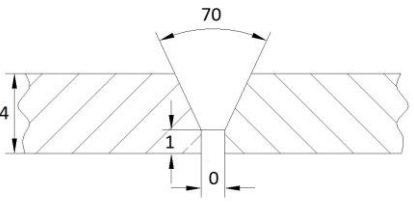
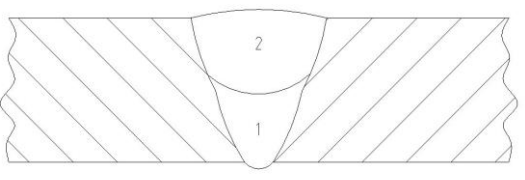
Tablica 8. Kutni zavareni spojevi


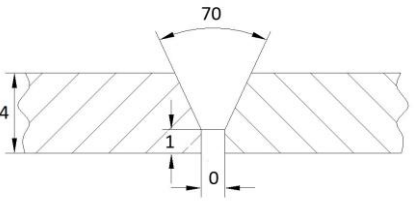
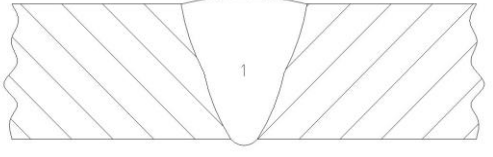
Uzorak 8


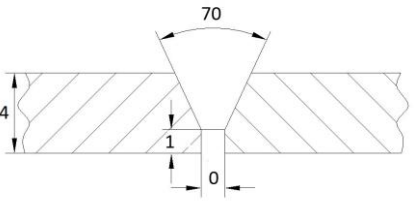
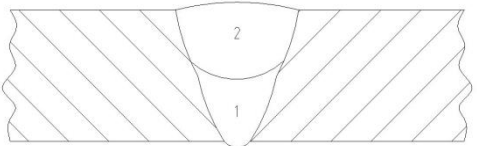



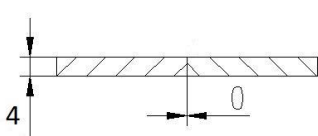
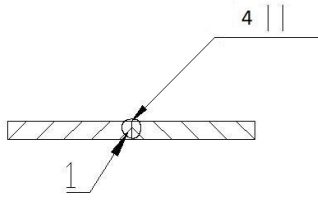
Uzorak 9


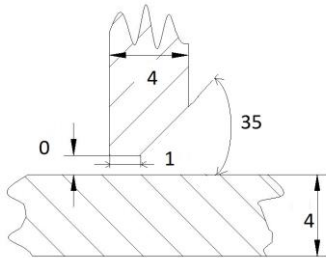
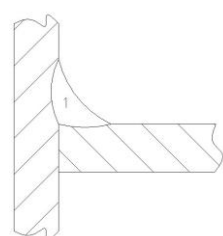
WPS za svali od uzoraka prikazan je na sljedećim stranicama. WPS-ovi su izrađeni u Slavenskom Brodu u Đuri Đakoviću, Specijalna vozila. Izradio ih je Mario Jagnjić dipl.ing.IWE. Svaki od uzoraka ima je označen brojem koji je također sadržan u WPS-u i nalazi se u gornjem desnom uglu kao prvi broj u registarskoj oznaci dokumenta.


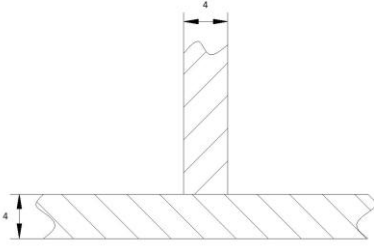
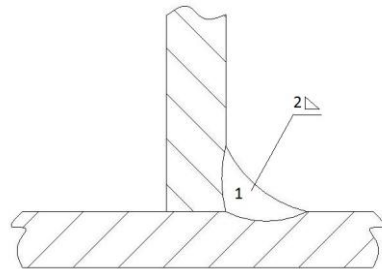
		UPUTA ZA ZAVARIVANJE WELDING PROCEDURE SPECIFICATION (WPS)				Reg.ozn.dok. / Doc.Reg.No. 01-MIG-ROB-017			
Objekt Object				Crtež broj Supporting drawing No.					
Postupak zavarivanja Welding procedure		MIG (131)		Osnovni materijal / Base metal					
Broj pripadajućeg atesta Supporting WPAR No.				Oznaka Mark	Grupa Group	Dimenzija / debljina Dimension / Thickness			
Ime zavarivača Welder's name				EN AW 5754	GR:22.3	LIM 4			
Tip procesa Welding process type		ROBOTIZIRANO		Simbol vrste spoja Sign of joint design	3A	Položaj zavarivanja Welding position	PA		
Vrsta spoja Joining type		BW-SUČEONI		Način žljebljenja Gouging					
Detalj pripreme žlijeba / Joint sketch 				Redoslijed zavarivanja / Welding sequence 					
Parametri zavarivanja / Welding parameters									
Sloj broj Pass No.	Proces zav. Welding proces	Promjer DM size FM (mm)	Jakost struje Current (A)	Napon Voltage (V)	Vrsta i polaritet Type / polarity	Protok plina Gas flow rate (l/min)	Brzina zav. Travel speed (cm/min)	Brzina žice Wire speed (m/min)	Unos topline Heat input (KJ/cm)
1	MIG (131)	1,2	120	19	AC(-)	12	75	7	
2	MIG (131)	1,2	170	19,5	AC(-)	12	120	9,6	
Dodatni i pomoćni materijal Filler and auxillaries metal					Temperatura predgrijavanja Preheat temperature				°C
Naziv i proizvođač Designation and manufacturer		ALUFIL AIMg5 OERLIKON			Međuslojna temperatura Interpass temperature		90		°C
Klasifikacija Classification		EN ISO 18273 AI 5356			Toplinska obrada Heat treatment		Da / Yes G		
Tip obloge Coat type							Ne / No G		
Sastav praška Flux composition					Tehnika rada Welding technique		Ravno / String		DA
							Nijanje / Wave bead		NE
Promjer i vrsta W-žice Size and type W-wire					Max. širina gusjenice Max. layer width				mm
Sušenje DM To dry FM					Početno i međuslojno čišćenje Cleaning initial and interpass				
Zaštitni plin / zaštita korijena Shielding gas / Backing gas		I1 ARGON 100% EN 439			Ostalo Other		ČIŠĆENJE		
Napomena / Comment: UREĐAJ ZA ZAVARIVANJE CMT (KORIŠTENA KOMBINACIJA CMT I PULSE STRUJE)					Standard / Norma EN ISO 14732 / EN 15614-2				
		Izradio/Prepared by MARIO JAGNIĆ dipl.ing.IWE			Odobrio / Ratify				
0		Datum / Date: 02.12.17			Datum / Date:				

		UPUTA ZA ZAVARIVANJE WELDING PROCEDURE SPECIFICATION (WPS)				Reg.ozn.dok. / Doc.Reg.No. 02-MIG-ROB-017			
Objekt Object		Crtež broj Supporting drawing No.							
Postupak zavarivanja Welding procedure	MIG (131)	Osnovni materijal / Base metal							
Broj pripadajućeg atesta Supporting WPAR No.		Oznaka Mark	Grupa Group	Dimenzija / debljina Dimension / Thickness					
Ime zavarivača Welder's name		EN AW 5754	GR:22.3	LIM 4					
Tip procesa Welding process type	ROBOTIZIRANO	Simbol vrste spoja Sign of joint design	3A	Položaj zavarivanja Welding position	PA				
Vrsta spoja Joining type	BW-SUČEONI	Način žljebljenja Gouging							
Detalj pripreme žlijeba / Joint sketch 		Redoslijed zavarivanja / Welding sequence 							
Parametri zavarivanja / Welding parameters									
Sloj broj Pass No.	Proces zav. Welding proces	Promjer DM size FM (mm)	Jakost struje Current (A)	Napon Voltage (V)	Vrsta i polaritet Type / polarity	Protok plina Gas flow rate (l/min)	Brzina zav. Travel speed (cm/min)	Brzina žice Wire speed (m/min)	Unos topline Heat input (KJ/cm)
1	MIG (131) PULSE	1,2	95	16-18	AC(—)	12	45	6,2	
Dodatni i pomoćni materijal Filler and auxillaries metal					Temperatura predgrijavanja Preheat temperature		°C		
Naziv i proizvođač Designation and manufacturer		ALUFIL AIMg5 OERLIKON			Međuslojna temperatura Interpass temperature		°C		
Klasifikacija Classification		EN ISO 18273 AI 5356			Toplinska obrada Heat treatment		Da / Yes G		
Tip obloge Coat type							Ne / No G		
Sastav praška Flux composition					Tehnika rada Welding technique		Ravno / String		DA
							Nijhanje / Wave bead		NE
Promjer i vrsta W-žice Size and type W-wire					Max. širina gusjenice Max. layer width		mm		
Sušenje DM To dry FM					Početno i međuslojno čišćenje Cleaning initial and interpass				
Zaštitni plin / zaštita korijena Shielding gas / Backing gas		I1 ARGON 100% EN 439			Ostalo Other		ČIŠĆENJE		
Napomena / Comment: KORIŠTENA PULSNA STRUJA						Standard / Norma EN ISO 14732 / EN 15614-2			
		Izradio/Prepared by MARIO JAGNJIĆ dipl.ing.IWE				Odobrio / Ratify			
0		Datum / Date:		02.12.17		Datum / Date:			

		UPUTA ZA ZAVARIVANJE WELDING PROCEDURE SPECIFICATION (WPS)				Reg.ozn.dok. / Doc.Reg.No. 03-MIG-ROB-017			
Objekt Object				Crtež broj Supporting drawing No.					
Postupak zavarivanja Welding procedure		MIG (131)		Osnovni materijal / Base metal					
Broj pripadajućeg atesta Supporting WPAR No.				Oznaka Mark	Grupa Group	Dimenzija / debljina Dimension / Thickness			
Ime zavarivača Welder's name				EN AW 5754	GR:22.3	LIM 4			
Tip procesa Welding process type		ROBOTIZIRANO		Simbol vrste spoja Sign of joint design	3A	Položaj zavarivanja Welding position	PA		
Vrsta spoja Joining type		BW-SUČEONI		Način žljebljenja Gouging					
Detalj pripreme žlijeba / Joint sketch 				Redoslijed zavarivanja / Welding sequence 					
Parametri zavarivanja / Welding parameters									
Sloj broj Pass No.	Proces zav. Welding proces	Promjer DM size FM (mm)	Jakost struje Current (A)	Napon Voltage (V)	Vrsta i polaritet Type / polarity	Protok plina Gas flow rate (l/min)	Brzina zav. Travel speed (cm/min)	Brzina žice Wire speed (m/min)	Unos topline Heat input (KJ/cm)
1	MIG (131) PULSE	1,2	95	16-18	AC(-)	12	65	5,6	
2	MIG (131) PULSE	1,2	135	19-20	AC(-)	12	120	8	
Dodatni i pomoćni materijal Filler and auxillaries metal					Temperatura predgrijavanja Preheat temperature				°C
Naziv i proizvođač Designation and manufacturer		ALUFIL AIMg5 OERLIKON			Međuslojna temperatura Interpass temperature		90		°C
Klasifikacija Classification		EN ISO 18273 AI 5356			Toplinska obrada Heat treatment		Da / Yes G		
Tip obloge Coat type							Ne / No G		
Sastav praška Flux composition					Tehnika rada Welding technique		Ravno / String		DA
							Nijhanje / Wave bead		NE
Promjer i vrsta W-žice Size and type W-wire					Max. širina gusjenice Max. layer width				mm
Sušenje DM To dry FM					Početno i međuslojno čišćenje Cleaning initial and interpass				
Zaštitni plin / zaštita korijena Shielding gas / Backing gas		I1 ARGON 100% EN 439			Ostalo Other		ČIŠĆENJE		
Napomena / Comment: KORIŠTENA PULSNA STRUJA						Standard / Norma EN ISO 14732 / EN 15614-2			
		Izradio/Prepared by MARIO JAGNIĆ dipl.ing.IWE				Odobrio / Ratify			
0		Datum / Date: 02.12.17				Datum / Date:			

		UPUTA ZA ZAVARIVANJE WELDING PROCEDURE SPECIFICATION (WPS)				Reg.ozn.dok. / Doc.Reg.No. 10-MIG-ROB-017			
Objekt Object				Crtež broj Supporting drawing No.					
Postupak zavarivanja Welding procedure		MIG (131)		Osnovni materijal / Base metal					
Broj pripadajućeg atesta Supporting WPAR No.				Oznaka Mark	Grupa Group	Dimenzija / debljina Dimension / Thickness			
Ime zavarivača Welder's name				EN AW 5754	GR:22.3	LIM 4			
Tip procesa Welding process type		ROBOTIZIRANO		Simbol vrste spoja Sign of joint design	4Í	Položaj zavarivanja Welding position	PA		
Vrsta spoja Joining type		BW-SUČEONI		Način žljebljenja Gouging					
Detalj pripreme žlijeba / Joint sketch 				Redoslijed zavarivanja / Welding sequence 					
Parametri zavarivanja / Welding parameters									
Sloj broj Pass No.	Proces zav. Welding proces	Promjer DM size FM (mm)	Jakost struje Current (A)	Napon Voltage (V)	Vrsta i polaritet Type / polarity	Protok plina Gas flow rate (l/min)	Brzina zav. Travel speed (cm/min)	Brzina žice Wire speed (m/min)	Unos topline Heat input (KJ/cm)
1	MIG (131) <small>CMT</small>	1,2	136	17-20	AC(-)	12	100	8	
Dodatni i pomoćni materijal Filler and auxillaries metal					Temperatura predgrijavanja Preheat temperature				°C
Naziv i proizvođač Designation and manufacturer		ALUFIL AIMg5 OERLIKON			Međuslojna temperatura Interpass temperature				°C
Klasifikacija Classification		EN ISO 18273 AI 5356			Toplinska obrada Heat treatment		Da / Yes G		
Tip obloge Coat type							Ne / No G		
Sastav praška Flux composition					Tehnika rada Welding technique		Ravno / String		DA
							Nijhanje / Wave bead		NE
Promjer i vrsta W-žice Size and type W-wire					Max. širina gusjenice Max. layer width				mm
Sušenje DM To dry FM					Početno i međuslojno čišćenje Cleaning initial and interpass				
Zaštitni plin / zaštita korijena Shielding gas / Backing gas		I1 ARGON 100% EN 439			Ostalo Other		ČIŠĆENJE		
Napomena / Comment: UREĐAJ ZA ZAVARIVANJE CMT (KORIŠTENA KOMBINACIJA CMT I PULSE STRUJE)					Standard / Norma EN ISO 14732 / EN 15614-2				
		Izradio/Prepared by MARIO JAGNJIĆ dipl.ing.IWE			Odobrio / Ratify				
0		Datum / Date: 02.12.17			Datum / Date:				

		UPUTA ZA ZAVARIVANJE WELDING PROCEDURE SPECIFICATION (WPS)				Reg.ozn.dok. / Doc.Reg.No. 08-MIG-ROB-017			
Objekt Object				Crtež broj Supporting drawing No.					
Postupak zavarivanja Welding procedure		MIG (131)		Osnovni materijal / Base metal					
Broj pripadajućeg atesta Supporting WPAR No.				Oznaka Mark		Grupa Group			
Ime zavarivača Welder's name				EN AW 5754		GR:22.3			
Tip procesa Welding process type		ROBOTIZIRANO		Simbol vrste spoja Sign of joint design		4Å			
Vrsta spoja Joining type		FW-KUTNI		Način žljebljenja Gouging		Položaj zavarivanja Welding position			
						PB			
Detalj pripreme žlijeba / Joint sketch				Redoslijed zavarivanja / Welding sequence					
									
Parametri zavarivanja / Welding parameters									
Sloj broj Pass No.	Proces zav. Welding proces	Promjer DM size FM (mm)	Jakost struje Current (A)	Napon Voltage (V)	Vrsta i polaritet Type / polarity	Protok plina Gas flow rate (l/min)	Brzina zav. Travel speed (cm/min)	Brzina žice Wire speed (cm/min)	Unos topline Heat input (KJ/cm)
1	MIG (131) <small>CMT</small>	1,2	150	17-20	AC(-)	12	75	8,5	
Dodatni i pomoćni materijal Filler and auxillaries metal					Temperatura predgrijavanja Preheat temperature		°C		
Naziv i proizvođač Designation and manufacturer		ALUFIL AIMg5 OERLIKON			Međuslojna temperatura Interpass temperature		°C		
Klasifikacija Classification		EN ISO 18273 AI 5356			Toplinska obrada Heat treatment		Da / Yes G		
Tip obloge Coat type							Ne / No G		
Sastav praška Flux composition					Tehnika rada Welding technique		Ravno / String		DA
							Nijhanje / Wave bead		NE
Promjer i vrsta W-žice Size and type W-wire					Max. širina gusjenice Max. layer width				mm
Sušenje DM To dry FM					Početno i međuslojno čišćenje Cleaning initial and interpass				
Zaštitni plin / zaštita korijena Shielding gas / Backing gas		I1 ARGON 100% EN 439			Ostalo Other		ČIŠĆENJE		
Napomena / Comment: KORIŠTEN CMT+PULSE						Standard / Norma EN ISO 14732 / EN 15614-2			
		Izradio/Prepared by MARIO JAGNIĆ dipl.ing.IWE				Odobrio / Ratify			
3		Datum / Date: 02.12.17				Datum / Date:			

		UPUTA ZA ZAVARIVANJE WELDING PROCEDURE SPECIFICATION (WPS)				Reg.ozn.dok. / Doc.Reg.No. 09-MIG-ROB-017			
Objekt Object		Crtež broj Supporting drawing No.							
Postupak zavarivanja Welding procedure	MIG (131)	Osnovni materijal / Base metal							
Broj pripadajućeg atesta Supporting WPAR No.		Oznaka Mark	Grupa Group	Dimenzija / debljina Dimension / Thickness					
Ime zavarivača Welder's name		EN AW 5754	GR:22.3	LIM 4					
Tip procesa Welding process type	ROBOTIZIRANO	Simbol vrste spoja Sign of joint design	2¹	Položaj zavarivanja Welding position		PB			
Vrsta spoja Joining type	FW-KUTNI	Način žljebljenja Gouging							
Detalj pripreme žljeba / Joint sketch 		Redoslijed zavarivanja / Welding sequence 							
Parametri zavarivanja / Welding parameters									
Sloj broj Pass No.	Proces zav. Welding proces	Promjer DM size FM (mm)	Jakost struje Current (A)	Napon Voltage (V)	Vrsta i polaritet Type / polarity	Protok plina Gas flow rate (l/min)	Brzina zav. Travel speed (cm/min)	Brzina žice Wire speed (cm/min)	Unos topline Heat input (KJ/cm)
1	MIG (131) <small>CMT</small>	1,2	150	17-20	AC(-)	12	75	8,5	
Dodatni i pomoćni materijal Filler and auxillaries metal					Temperatura predgrijavanja Preheat temperature		°C		
Naziv i proizvođač Designation and manufacturer		ALUFIL AIMg5 OERLIKON			Međuslojna temperatura Interpass temperature		°C		
Klasifikacija Classification		EN ISO 18273 AI 5356			Toplinska obrada Heat treatment		Da / Yes G		
Tip obloge Coat type							Ne / No G		
Sastav praška Flux composition					Tehnika rada Welding technique		Ravno / String		DA
							Nijhanje / Wave bead		NE
Promjer i vrsta W-žice Size and type W-wire					Max. širina gusjenice Max. layer width		mm		
Sušenje DM To dry FM					Početno i međuslojno čišćenje Cleaning initial and interpass				
Zaštitni plin / zaštita korijena Shielding gas / Backing gas		I1 ARGON 100% EN 439			Ostalo Other		ČIŠĆENJE		
Napomena / Comment: UREDAJ ZA ZAVARIVANJE CMT (KORIŠTENA KOMBINACIJA CMT I PULSE STRUJE)						Standard / Norma EN ISO 14732 / EN 15614-2			
		Izradio/Prepared by MARIO JAGNIĆ dipl.ing.IWE				Odobrio / Ratify			
0		Datum / Date:		02.12.17		Datum / Date:			

7.2. Nerazorna ispitivanja

Prema normi HRN EN ISO 15614-2 nad zavarenim uzorcima se provode različita ispitivanja koja pokazuju kako se ponašaju uzorci u ispitnim uvjetima. Da bi uzorci zadovoljili te da bi se znalo stanje uzoraka prije razornih ispitivanja potrebno je provesti nerazorne metode ispitivanja uzoraka te pomoću njih otkriti moguće nedostatke u zavarenom spoju. Nerazorna ispitivanja pružaju uvid u stanje zavarenog spoja te se na temelju njih donose kasniji zaključci vezani za uspješnost postupka zavarivanja.

7.2.1. Vizualna metoda ispitivanja

Po slikama uzoraka koji su prikazani u tablici 7. vidljivo je da korištenje CMT tehnologije zavarivanja u kombinaciji s pulsnom strujom daje estetski prihvatljivije rezultate te da dolazi do manjeg prskanja nego kod korištenja samo pulsne struje. Iako je prskanje svedeno na minimum kod obje varijante ipak varijanta CMT + PULSE daje bolje rezultate. Sljedeće što se može primijetiti na slikama je činjenica da zavareni spoj izveden CMT + PULSE tehnologijom ima glađu površinu te zona utjecaja topline ima pravilniji oblik te samim time je osigurana ujednačena kvaliteta zavarenog spoja. Korijen zavarenog spoja je kod obje tehnologije podjednako dobar. Na uzorcima 1, 2 i 3 prije zavarivanja izvedena je predobrada ploča koje su se zavarivale, a uzorak 10 zavaren je bez predobrade ploča. Cilj kod izrade uzoraka je bio napraviti dobar zavareni spoj uz što veću optimizaciju procesa zavarivanja. Izostavljanjem predobrade smanjuju se troškovi procesa te se uvelike pojeftinjuje i ubrzava proces, također je određene uštede moguće postići smanjenjem broja slojeva zavarenog spoja. Osim što smanjenje broja prolaza pojeftinjuje proces također ima i pozitivno djelovanje na mehanička svojstva. Smanjenjem broja prolaza smanjuje se unos topline u osnovni materijal te se time dobivaju kvalitetniji zavareni spojevi.

Uzorak 1 je zavaren uz predobradu i zavareni spoj se sastoji od dva među sloja, korijenskog i prvog prolaza. Daje najbolja estetska svojstva te je brzina zavarivanja korijena nešto veća od brzine zavarivanja korijena kod uzorka 3. Taj uzorak daje veoma dobre rezultate kod ispitivanja vizualnom metodom jer ima lijepe površine bez pora ili pukotina.

Uzorak 2 je neuspjao pokušaj optimizacije procesa. Namjera je bila smanjiti broj prolaza ali ostaviti predobradu. Već na vizualnom ispitivanju taj uzorak ne prolazi jer nema nikakvog nadvišenja, tj. ima udubljenje što mu uvelike smanjuje mehanička svojstva.

Uzorak 3 kod ispitivanja vizualnom metodom pokazuje nešto lošija svojstva jer je nešto hrapaviji od uzorka 1. Pore ili pukotine nisu uočljive, a korijen zavarenog spoja je lijepo protaljen tako da i uzorak 3 daje veoma dobre rezultate kod ispitivanja vizualnom metodom.

Uzorak 10 je izrađen kako bi se ispitalo dali je moguće maksimalno smanjenje troškova proizvodnje, tako da se izbací predobrada i da se zavarivanje svede samo na jedan prolaz. Taj uzorak prolazi vizualnu metodu jer postoji blago nadvišenje zavarenog spoja uz potpuno provaren korijen.

Uzorci 8 i 9 su kutni zavareni spojevi. Uzorak 8 je izveden uz predobradu jedne od ploča, a uzorak 9 bez predobrade. Vizualnu metodu prolaze oba uzorka. Zavareni spoj je estetski korektan, a jedina razlika je to što je kod uzorka 9 nešto veće nadvišenje. Kod izrade uzorka 9 iskorišteno je znatno manje resursa jer nije izvedena predobrada, pa je to ujedno i optimalno rješenje.

7.2.2. Ispitivanje penetrantima

Ispitivanje penetrantima je provedeno za uzorke 8 i 9. Za ostale uzorke ispitivanje penetrantima nije bilo potrebno jer sučeljeni spoj ne pokazuje toliku tendenciju pojavi pukotina ili pora na površini spoja, a i vizualna metoda pokazuje da je površina zavarenih spojeva kod uzoraka 1, 3 i 10 glatka i bez nepravilnosti. Kod kutnih spojeva ispitivanje penetrantima izvedeno je ponajviše iz dva razloga. Prvi od tih razloga je da je kod kutnih zavarenih spojeva mnogo teže uočiti nepravilnosti poput naljepljivanja ili sitnih mikroskopskih pukotina nego kod sučeljenih spojeva, a drugi razlog je taj da je rendgensko snimanje kutnih spojeva otežano te je samim time i otežano otkrivanje nepravilnosti.

Ispitivanje penetrantima sastoji se od nekoliko koraka. Prvi od tih koraka je čišćenje površine na koju se nanosi penetrant od raznih nečistoća i masnoća. Nakon čišćenja površine na cijelu površinu zavarenog spoja nanesen je penetrant kao što je prikazano na slikama 26. i 27. Na slikama se vidi da je penetrant nanesen ravnomjerno na cijelu površinu te je tako ostavljen da se upije 10 minuta.



Slika 26. Nanošenje penetranta-Uzorak 8



Slika 27. Nanošenje penetranta-Uzorak 9

Nakon što je prošlo 10 minuta penetrant se čisti krpom i sredstvom za uklanjanje penetranta s površine i pritom je potrebno obratiti pozornost da se sredstvo za čišćenje ne nanosi izravno na površinu jer bi u tom slučaju moglo kompromitirati rezultate. Čišćenje je potrebno provesti do te razine da se više ne vidi crvena boja penetranta na površini zavarenog spoja. Nakon što je uklonjen penetrant nanosi se razvijač na površinu koji je bijele boje. Razvijač služi tome da izvuče penetrant iz pukotina na površinu te da pruži kontrast da se eventualni nedostaci mogu lagano uočiti. Naneseni razvijač prikazan je na slikama 28. i 29. Na slici 28. prikazana je površina uzorka 8. nakon 10 minuta stajanja razvijača, a na slici 29. površina uzorka 9. nakon 10 minuta. Na slikama se mogu vidjeti mjesta na kojima penetrant izlazi na površinu te se na tim mjestima nalaze mikro pukotine.



Slika 28. Razvijač nakon 10 minuta-Uzorak 8



Slika 29. Razvijač nakon 10 minuta-Uzorak 9

Nakon daljnjeg promatranja ponašanja penetranta ustanovljeno je kako indikacije koje su se pojavile nakon 10 minuta promatranja ne postaju veće, tj. površina izvučenog penetranta se ne povećava nakon 15 minuta promatranja. Taj podatak pokazuje da su nepravilnosti koje su otkrivene penetrantima izrazito plitke te da se ne radi o nepravilnostima koje bi imale presudan značaj za kvalitetu zavarenog spoja. Na slikama 30. i 31. prikazani su uzorci nakon 15 minuta stajanja razvijača na površini.



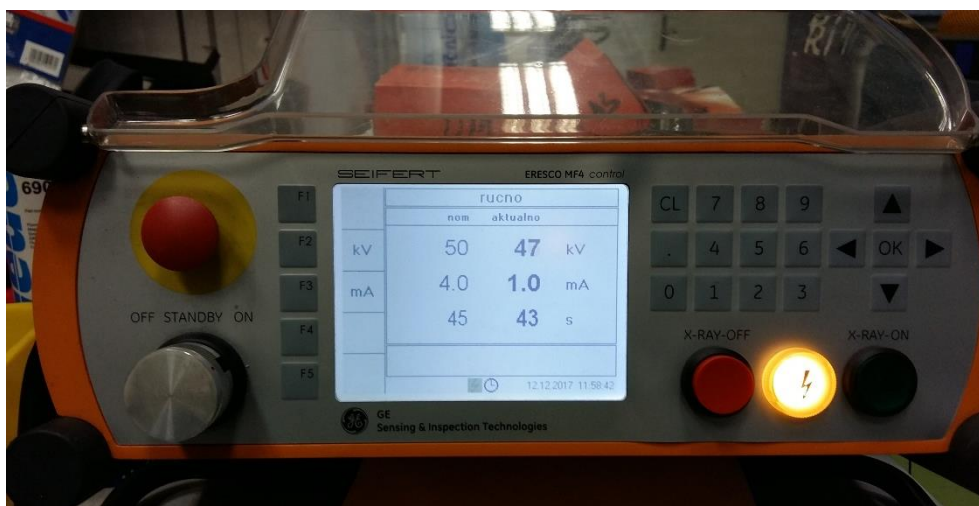
Slika 30. Razvijač nakon 15 minuta-Uzorak 8



Slika 31. Razvijač nakon 15 minuta-Uzorak 9

7.2.3. Radiografsko ispitivanje

Kod radiografskog ispitivanja snimaju se uzorci rendgenskim uređajem te se tako otkrivaju nepravilnosti unutar zavarenog spoja bez potrebe da se taj spoj uništi. Ispitivanje se provelo na rendgenskom uređaju BALTEAU GM 300D. Uzorci su snimani rendgenom na slikovnu ploču Industrex XL blue 14" x 17" te nakon toga skenirani skener uređajem VMI 3600SF. Parametri skeniranja skener uređaja su: napon lasera 15 V, napon fotomultiplikatora 5,25 V te rezolucija skeniranja 50 μm . Snimanje rendgenskim uređajem provedeno je na sljedećim parametrima: napon snimanja 50 kV, struja snimanja 4 mA te vrijeme snimanja 45 sekundi. Na slici 32. mogu se vidjeti ti parametri tijekom snimanja.



Slika 32. Parametri rendgenskog snimanja

Na slikama 33. i 34. prikazan je izgled rendgen uređaja i skener uređaja kojima je izvedeno snimanje i skeniranje uzoraka. Na slici 33. također se vidi položaj u kojem se snima zavareni spoj.



Slika 33. Rendgen uređaj BALTEAU GM 300D



Slika 34. Skener uređaj VMI 3600SF

Prije početka snimanja potrebno je pripremiti uzorak koji se snima. Na slici 35. prikazan je uzorak sa svim potrebnim indikatorima. Na toj slici se vidi indikator kvalitete radiograma, broj koji označava broj uzorka, strelica koja označava smjer zavarivanja te kao indikator prostorne rezolucije korišten je duplex indikator prema normi EN 462-5.

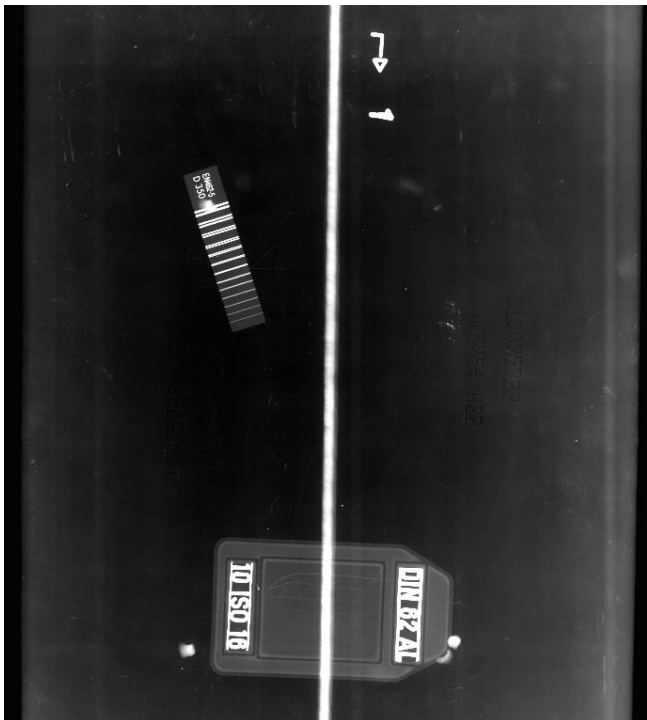
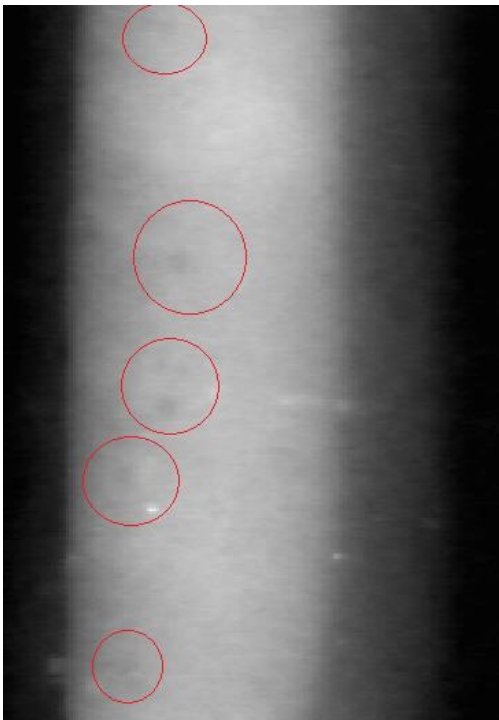


Slika 35. Uzorak sa svim indikatorima

7.2.3.1. Rezultati radiografskog ispitivanja

Nakon što su uzorci snimljeni i skenirani izvršena je obrada tih uzoraka u programu ISee demo te su rezultati prikazani u tablici 9. i 10. U tablici 9. i 10. nalaze se slike razvrstane po broju uzorka, podijeljene u dva stupca. U lijevom stupcu su snimke cijelog uzorka, a u desnom su uvećani pojedini dijelovi snimke na kojima su vidljive nepravilnosti unutar zavarenog spoja.

Tablica 9. Rezultati radiografskog ispitivanja sučeljenog zavareno spoja

Snimka cijelog uzorka	Uvećani dio snimke uzorka
 <p data-bbox="470 1989 587 2018">Uzorak 1</p>	 <p data-bbox="1088 1989 1225 2018">Uzorak 1a</p>

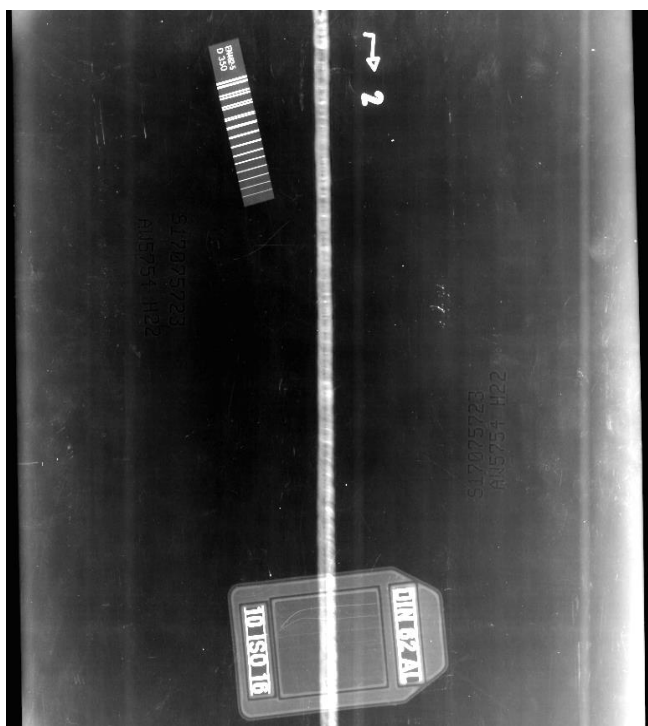
Na uvećanim snimkama uzorka 1 mogu se primijetiti nepravilnosti u zavarenom spoju koje su ujedno označene na slikama pomoću crvenih krugova.

Na uzorku 1a prikazane su nepravilnosti unutar materijala koje su klasificirane kao sitne pore. Pore se mogu prepoznati po pravilnom okruglom obliku. Na uzorku 1b također su označene sitne pore no one koje su tamnije boje su nešto većeg oblika i nalaze se bliže površini.

Kroz cijeli uzorak 1 nađene su nepravilnosti pora, no te pore su veoma sitne i česte kod zavarenih aluminijskih spojeva. Iako te pore smanjuju mehanička svojstva zavarenog spoja one nisu presudne te njihova pojava ne znači da je zavareni spoj loše izveden.

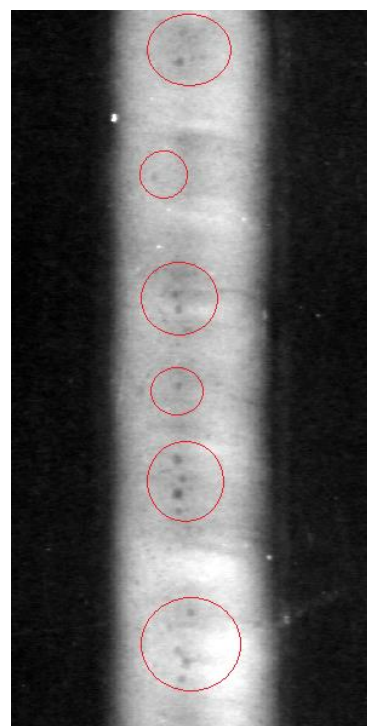


Uzorak 1b



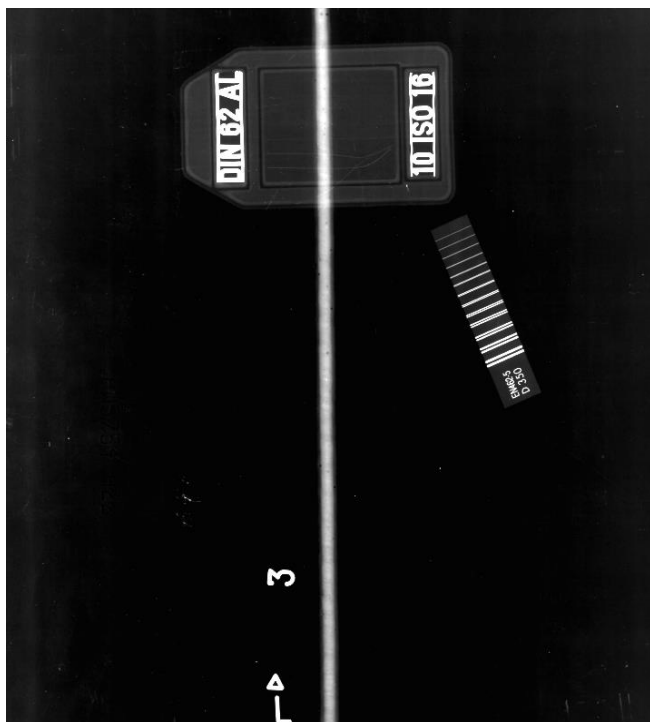
Uzorak 2

Na uvećanoj slici uzorka 2a vidljivo je mnoštvo nepravilnosti koje se nalaze na cijeloj dužini zavarenog spoja za razliku od uzorka 1 ovdje su nepravilnosti uočljivije zbog toga jer je manja



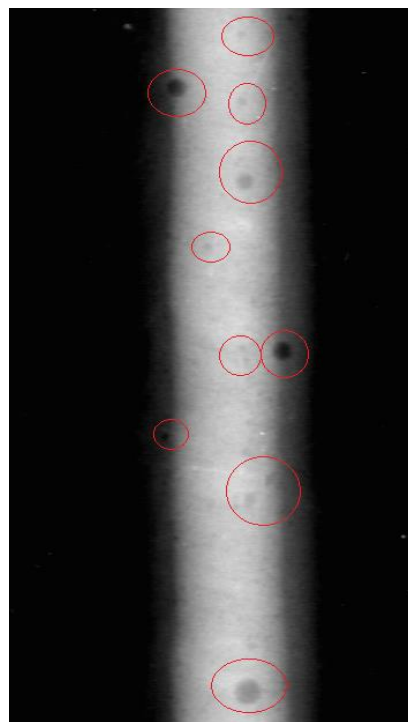
Uzorak 2a

debljina zavarenog spoja. Iako su pore uobičajene kod zavarivanja aluminijских legura kod uzorka 2 imaju nešto veći volumen i ima ih više tako da je pretpostavka da će utjecati na mehanička svojstva zavarenog spoja.

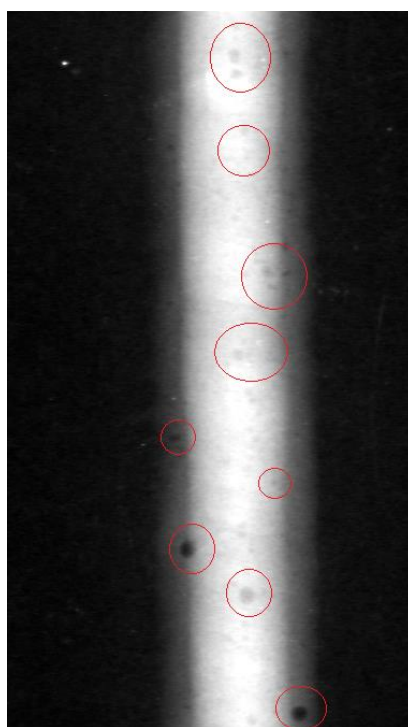


Uzorak 3

Kod uzorka 3 na rendgenskoj snimci otkriven je puno veći broj nepravilnosti tj. pora nego kod uzorka 1. pore koje se mogu vidjeti na uvećanim slikama uzorka 3a i 3b su poprilično velikog volumena. Iako je njihova pojava uobičajena ipak tako velik volumen može smanjiti mehanička svojstva zavarenog spoja. Pore koje su označene crvenim kružićima nalaze se duž cijelog zavarenog spoja. Kako je jedina razlika između uzorka 1 i uzorka 3 ta što je uzorak 1 zavaren CMT+PULSE tehnologijom, a uzorak 3 samo pulsnom strujom dolazi se do zaključka da zavarivanje CMT+PULSE tehnologijom daje kvalitetnije

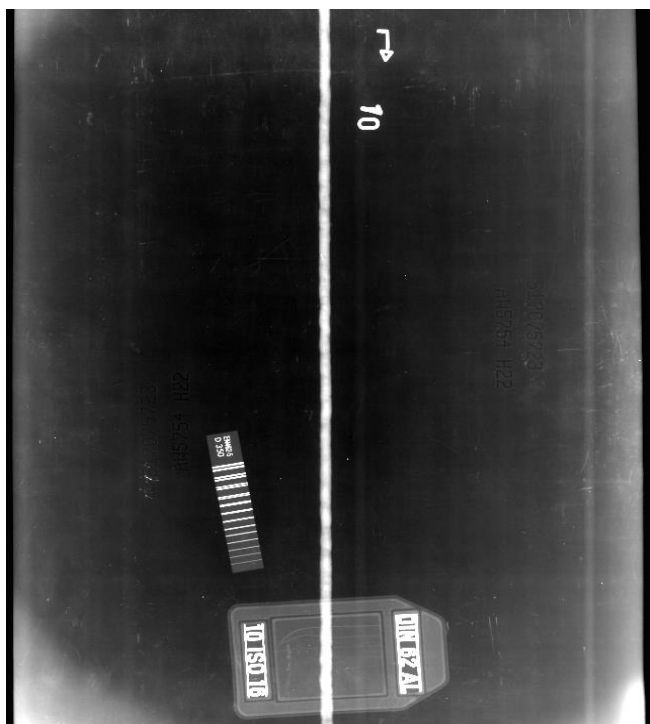


Uzorak 3a



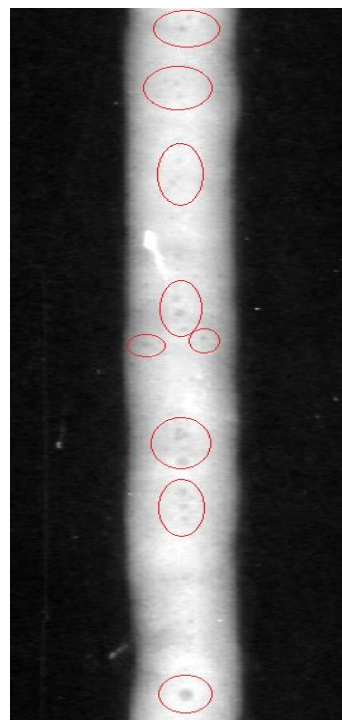
Uzorak 3b

zavarene spojeve te da je pogodniji za zavarivanje aluminijskih legura.

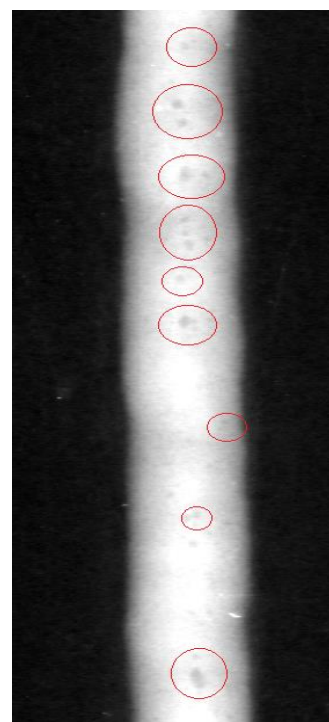


Uzorak 10

Proučavanjem rezultata snimanja kod uzorka 10 vidljivo je da zavareni spoj sadrži više pora nego kod uzorka 1. Označene pore na uzorku 10a i 10b prolaze cijelom dužinom zavarenog spoja, no te pore su malog volumena i iako ih ima poveći broj to je uobičajeno kod zavarivanja aluminijskih legura. Iako svaka nepravilnost utječe na kvalitetu zavarenog spoja pore koje se vide na uvećanim snimkama uzorka 10a i 10b ne bi trebale imati presudan utjecaj na mehanička svojstva, a samim time i na kvalitetu zavarenog spoja.


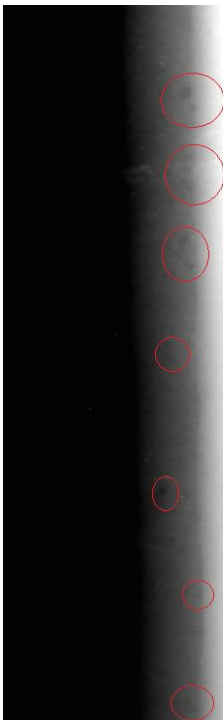
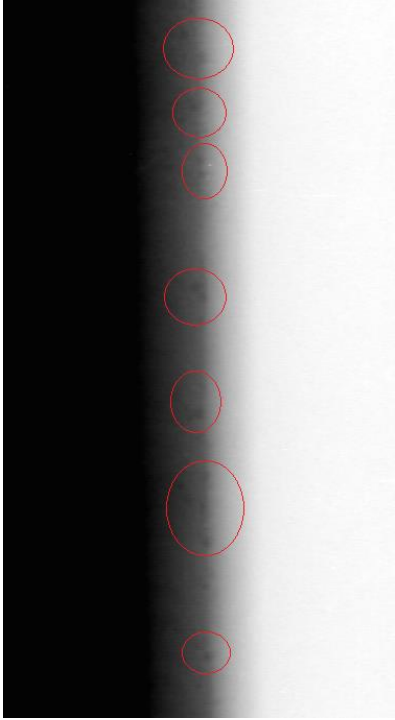


Uzorak 10a



Uzorak 10b

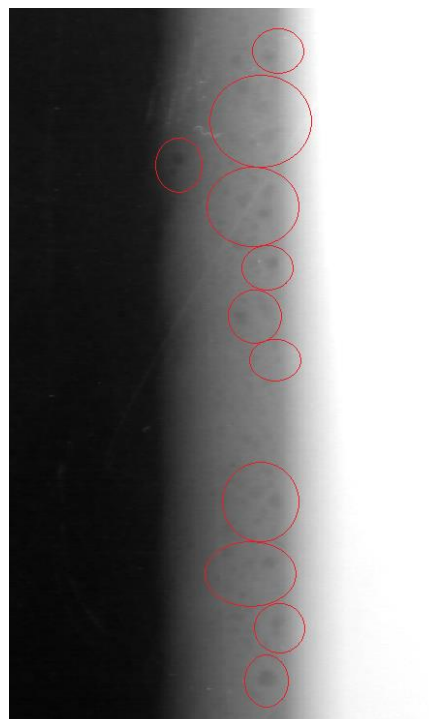
Tablica 10. Rezultati radiografskog ispitivanja kutnog zavarenog spoja

Snimka cijelog uzorka	Uvećani dio snimke uzorka
 <p data-bbox="432 1070 553 1104">Uzorak 8</p> <p data-bbox="199 1144 786 1765">Proučavanjem rendgenskih snimki kutnog zavarenog spoja uzorka 8 uočljive su nepravilnosti kao i kod sučeljenih spojeva, a to su pore. Iako se pore pojavljuju na svim aluminijskim zavarenim spojevima na uzorku 8 može se vidjeti da se pore kod ovog zavarenog spoja pojavljuju u grupama tj. događa se pojava gnijezda pora. Iako su pore manjih volumena i ne bi smjele predstavljati ključnu ulogu u kvaliteti zavarenog spoja, problem koji se javlja kod gnijezda pora je taj da one na jednom mjestu oslabljuju zavareni spoj dok je ostatak zavarenog spoja dobre kvalitete. Takve nepravilnosti dovode različitih mogućnosti opterećenja zavarenog spoja što je nepoželjno u terenskim zavarenim spojevima.</p>	 <p data-bbox="1034 1070 1169 1104">Uzorak 8a</p>  <p data-bbox="1034 1863 1169 1897">Uzorak 8b</p>

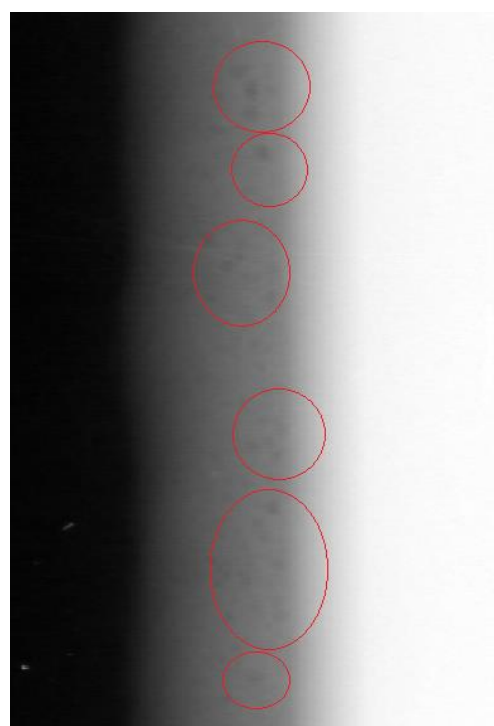


Uzorak 9

Uzorak 9 također u zavarenom spoju sadrži niz nepravilnosti. Pore koje se nalaze u zavarenom spoju označene su na uvećanim slikama uzoraka 9a i 9b. Kod uzorka 9 još je izraženije nakupljanje sitnih pora u gnijezda nego kod uzorka 8. Uzroci nastajanja pora i gnijezda pora su različiti, od slabe zaštite procesa zavarivanja, neodgovarajućih parametara i tehnike rada do nečistoća i vlage u dodatnom materijalu i na mjestu zavarivanja. Nastajanje pora također je povezano s hladnoćom tijekom zavarivanja koja bi mogla biti čak i najveći razlog nastanka pora ako se uzme u obzir vrijeme zavarivanja kada su temperature bile izrazito niske, a grijanje hale u kojoj se zavarivalo nije radilo.



Uzorak 9a



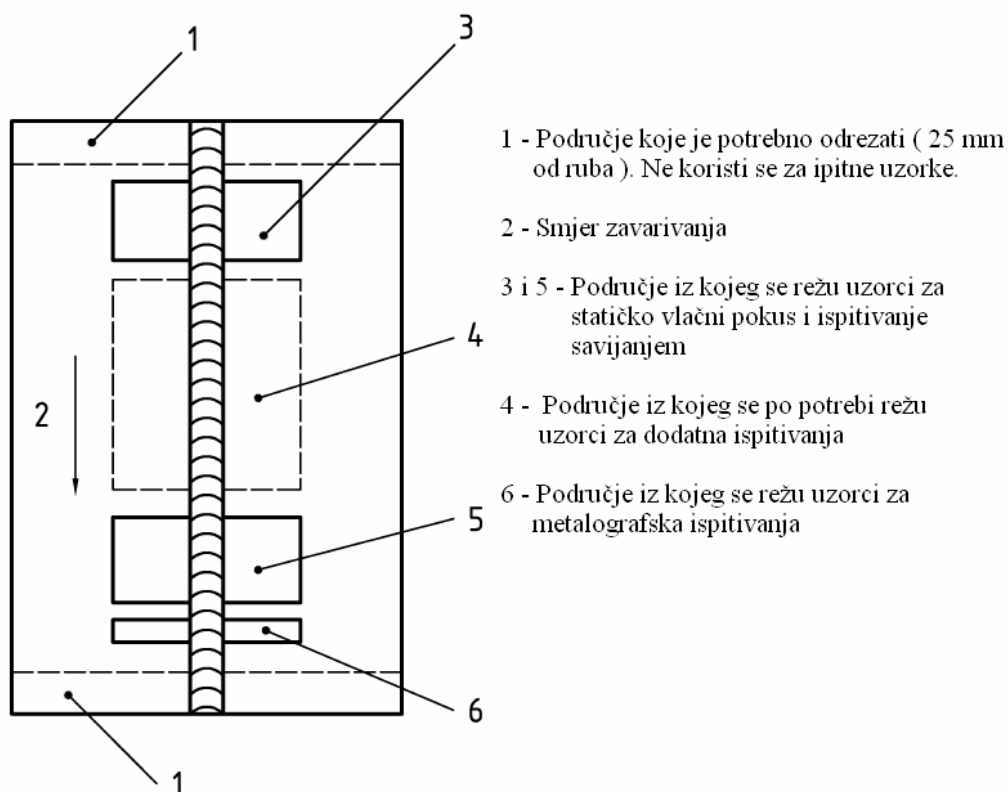
Uzorak 9b

7.3. Razorna ispitivanja

Nakon nerazornih ispitivanja dolaze razorna ispitivanja. Kako im samo ime govori to su ispitivanja u kojima se uzorci režu na razne epruvete i manje uzorke kako bi se podvrgnuli različitim pokusima preko kojih se dobivaju informacije o mehaničkim svojstvima zavarenog spoja, izgledu zavarenog spoja unutar materijala te veličini zone utjecaja topline. Svi provedeni testovi pobliže su opisani u sljedećim poglavljima.

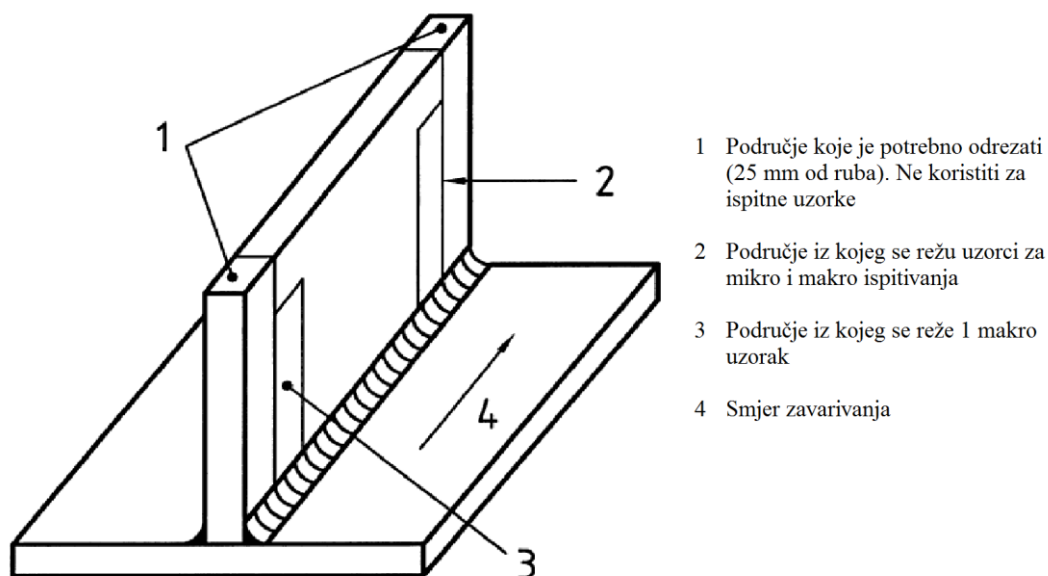
7.3.1. Priprema uzoraka

Da bi se ispitivanja mogla uspješno provesti potrebno je izvesti pripremu uzoraka. Zavarene ploče potrebno je izrezati na odgovarajuću veličinu za provođenje ispitivanja. Izrezivanje se provodi prema odgovarajućoj normi HR EN ISO 15614-2, a shematski prikaz izrezivanja prikazan je na slici 36. Nestabilnosti električnog luka koje se javljaju na početku zavarivanja mogu uzrokovati nepravilnosti te se zbog toga odbacuje početnih 25 mm uzorka te se taj dio ne koristi za nikakva ispitivanja.



Slika 36. Shematski prikaz izrade ispitnih uzoraka na zavarenom sučeljenom spoju prema normi HR ISO 15614-2

Isto kao što postoji shematski prikaz izrade ispitnih uzoraka za zavareni sučeljeni spoj tako se nalazi u normi HR EN ISO 15614-2 shematski prikaz izrade uzoraka za zavareni kutni spoj koji je prikazan na slici 37.



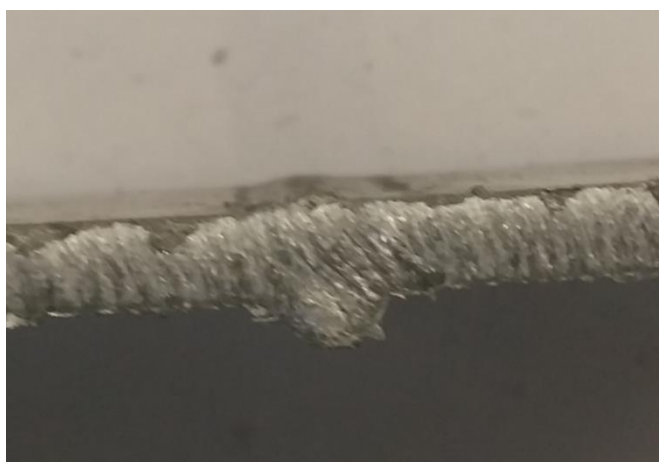
Slika 37. Shematski prikaz izrade ispitnih uzoraka na zavarenom kutnom spoju prema normi HR ISO 15614-2

Na slici 38. prikazan je postupak izrezivanja epruveta pomoću zračne plazme. Izrezivanje je provedeno sljedećim parametrima: brzina rezanja 1,8m/min, struja rezanja 67 A, a rezanje je provedeno sapnicom promjera 1,1 mm.

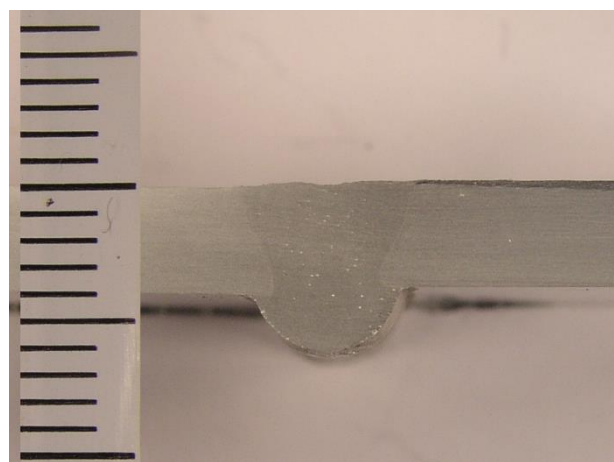


Slika 38. Izrezivanje epruveta

Nakon izrezivanja epruvete je potrebno još dodatno pripremiti za pojedine testove. Epruvetama koje služe kao makro izbrusci nakon izrezivanja turpijaju se rubovi da se skinu sruh koji je ostao nakon izrezivanja te im se površina brusi s brusnim papirima različitih granulacija, a zatim se polira. Nakon poliranja vrši se ispiranje površine alkoholom i vodom kako bi se odstranile masnoće i sitne granule skinutog osnovnog materijala. Kada je mehanička obrada uzorka završena izvodi se kemijska obrada sredstvom za nagrizzanje materijala. Nagrizzanjem površine dobije se uočljiv izgled strukture zavarenog spoja. Na slici 39. vidljiv je izgled makroizbruska nakon izrezivanja, a na slici 40. izgled pripremljenog makro izbruska.



Slika 39. Makroizbrusak prije potrebne obrade



Slika 40. Izgled makroizbruska nakon potrebne obrade

Za potrebe ispitivanja savijanjem izrezane epruvete je potrebno samo pobrusiti tako da se uklone nadvišenja lica zavarenog spoja i korijena. Osim uklanjanja nadvišenja brušenjem se uklanjaju i mikropukotine koje su mogle nastati kod izrezivanja epruveta, a koje bi mogle uzrokovati prijevremeno pucanje ispitnih epruveta. Na slici 41. prikazan je izgled epruvete prije brušenja, a na slici 42. nakon brušenja. Nakon brušenja epruveta je spremna za ispitivanje savijanjem. Kao što je vidljivo na slici 42. površina je dovoljno glatka i nema nikakvih nadvišenja koja bi mogla kompromitirati ispitivanje.

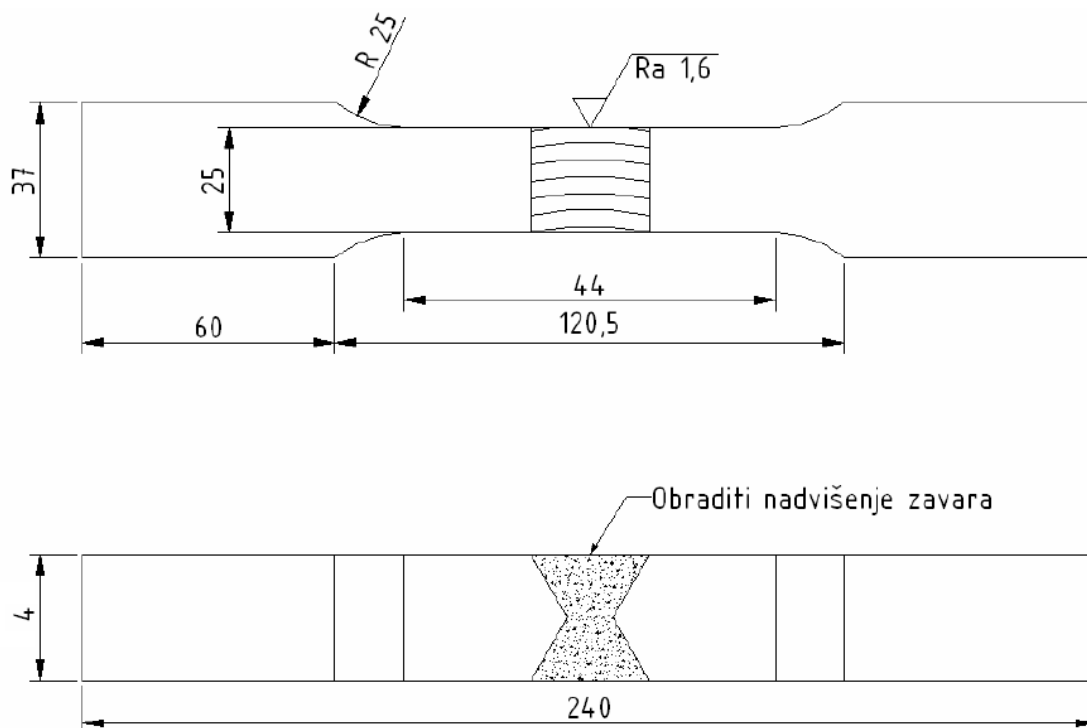


Slika 41. Epruveta prije brušenja



Slika 42. Epruveta nakon brušenja

Epruvetama za kidanje oblikuje se suženje strojnom obradom tj. glodanjem te se nakon toga izvodi brušenje nadvišenja zavarenog spoja. Epruvete koje se pripremaju za kidanje potrebno je strojnom obradom obraditi na veličine kao što su prikazane na slici 43. Nakon strojne obrade brušenjem se uklanjaju nadvišenja zavarenog spoja nakon čega je epruveta spremna za provedbu ispitivanja.

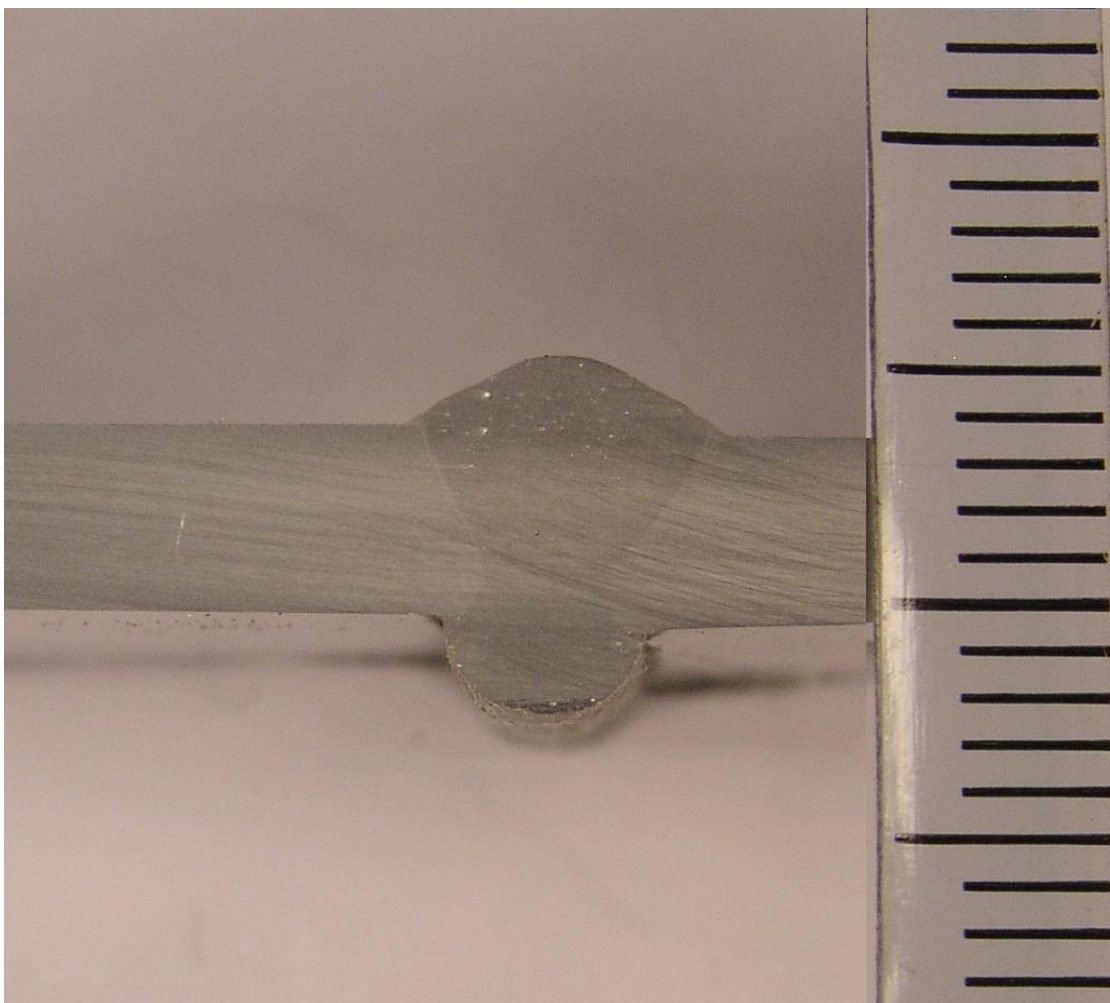


Slika 43. Skica epruvete za statički vlačni pokus

7.3.2. Makroizbrusci

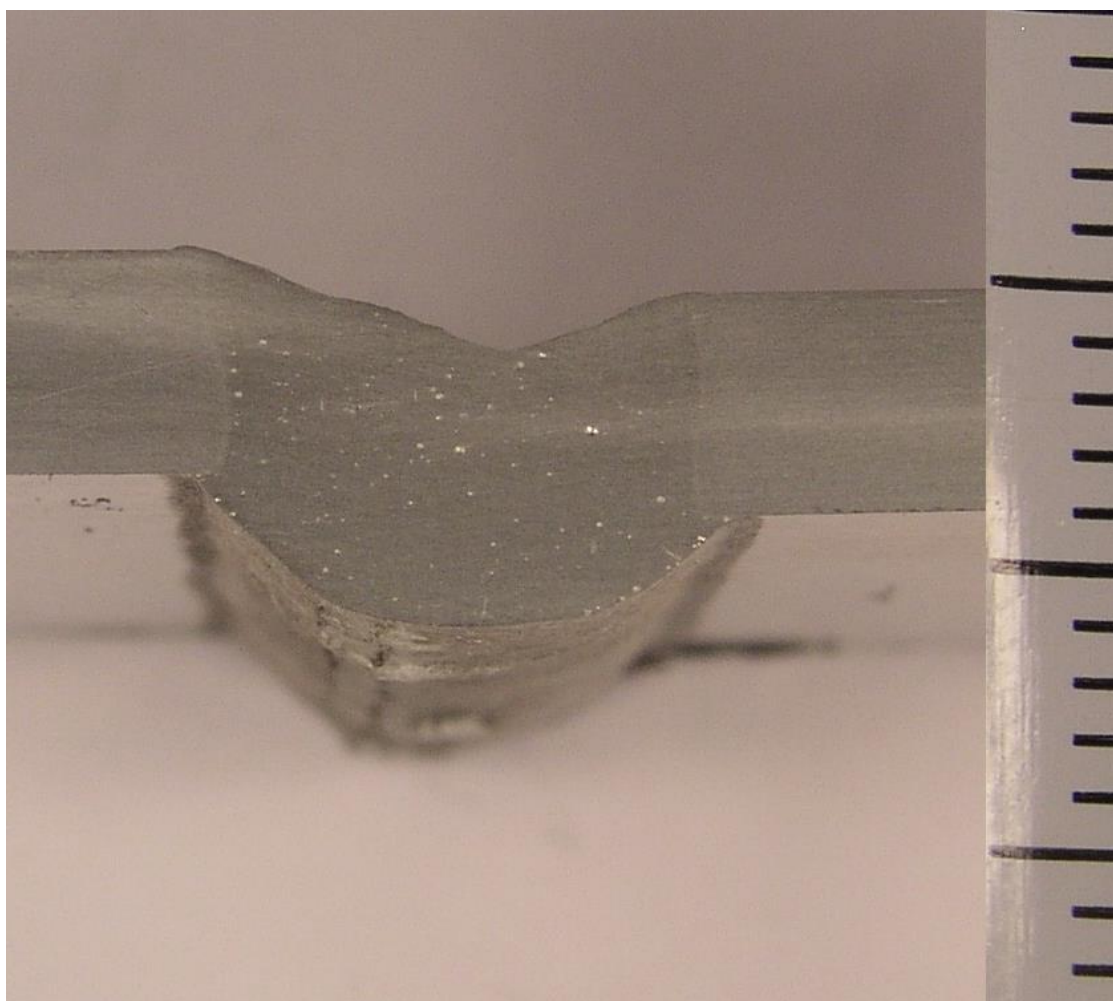
Izrada uzoraka za makroskopska ispitivanja provedena je sukladno normi ISO 17639. Prema normi navedeno je da uzorci koji se koriste za makroskopska ispitivanja moraju biti orijentirani poprečno na zavareni spoj i to za sučeljeni i kutni zavareni spoj, moraju obuhvaćati zavareni spoj te zonu utjecaja topline s obje strane zavarenog spoja. Izgled uzoraka prikazan je na sljedećim slikama.

Na slici 44. prikazan je makroizbrusak uzorka 1. Na makroizbrusku jasno je vidljivo kao i na rendgenskim snimkama pojava pora u zavarenom spoju. Može se primijetiti istaknuta grupacija sitnih pora u drugom prolazu zavarenog spoja, dok je korijenski prolaz sa samo nekoliko sitnih pora. Izgled zavarenog spoja je dobar te nema naznaka nekih drugih grešaka u zavarenom spoju. Pore koje su uočljive i koje su se pojavile u zavarenom spoju uobičajena su pojava kod zavarivanja aluminijskih legura. Njihovo prisustvo smanjuje mehanička svojstva, no zavareni spoj bi trebao usprkos smanjenim mehaničkim svojstvima zadovoljavati.



Slika 44. Makroizbrusak - Uzorak 1

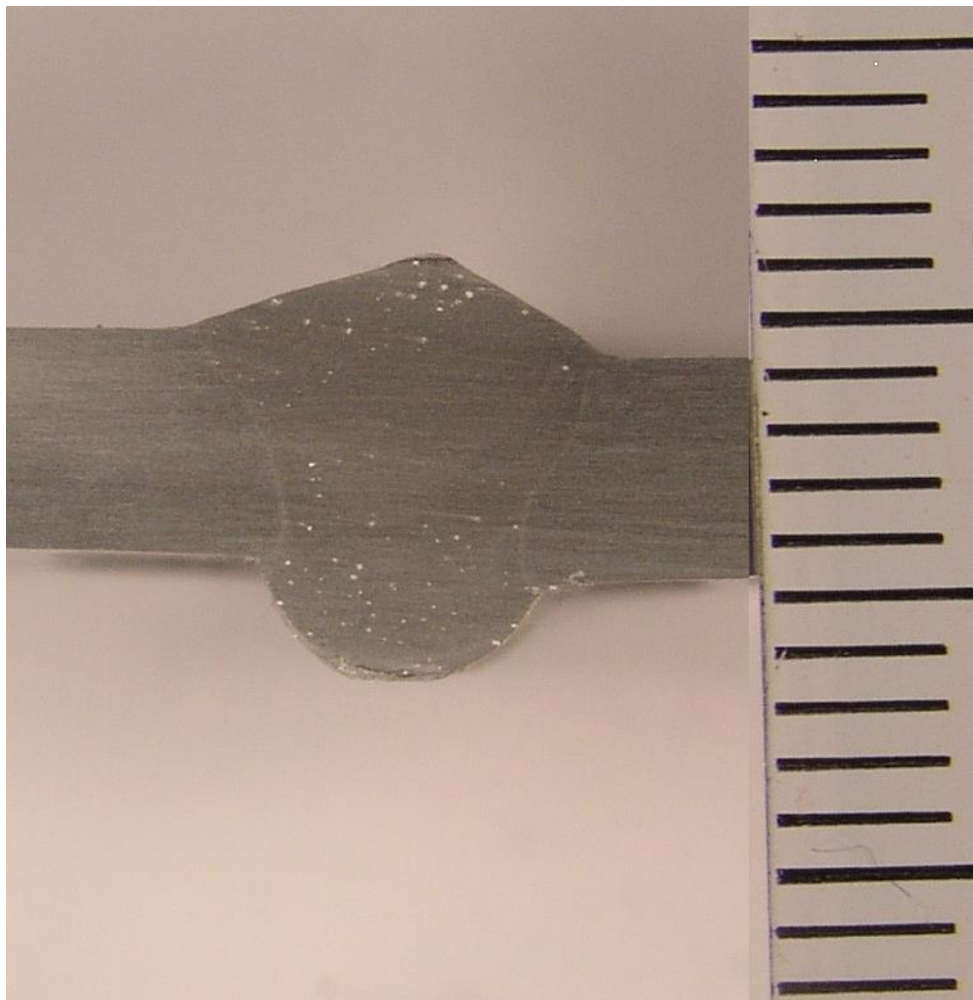
Na slici 45. prikazan je makroizbrusak uzorka 2. Kod uzorka 2 može se primijetiti također velika količina pora u metalu zavora. Kod uzorka 2 pore se nalaze u cijelom zavarenom spoju te ih ima znatno više i većeg su volumena nego kod uzorka 1. Iako uzorak 2 ne prolazi vizualnu metodu ispitivanja zbog nedostatka nadvišenja zavarenog spoja napravljen je makroizbrusak kako bi utvrdili geometriju zavarenog spoja i nepravilnosti koje se nalaze unutar metala zavarenog spoja. Vidljivo je da nema drugih nepravilnosti unutar metala zavarenog spoja osim pora, ali zavareni spoj izgleda kao da ploče prije zavarivanja nisu bile predobrađene jer je granica između metala zavarenog spoja i osnovnog materijala skoro ravna te zavareni spoj nema klasičan V oblik.



Slika 45. Makroizbrusak - Uzorak 2

Makroizbrusak uzorka 3 prikazan je na slici 46. Na njemu je vidljiva veća količina nepravilnosti u obliku pora. Pore koje se nalaze u metalu zavora koncentrirane su u korijenu zavarenog spoja i u samom nadvišenju zavarenog spoja dok je sredina zavarenog spoja relativno čista. Za razliku od uzorka 1 gdje su pore manjeg volumena i u manjoj količini može se zaključiti da na

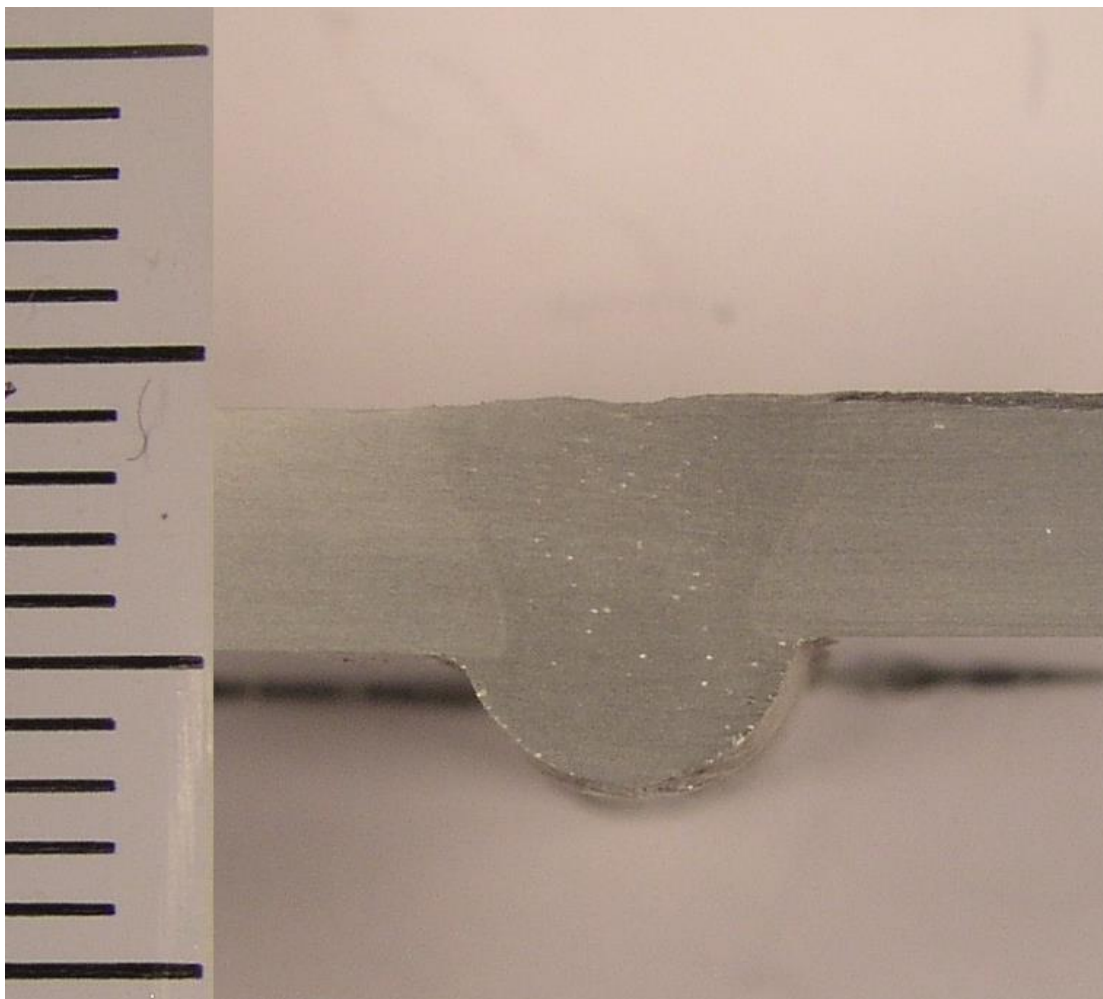
nastajanje pora ima također ulogu i tehnologija zavarivanja. Parametri kod zavarivanja skoro su pa identični, a i uvjeti u okolini te stanje dodatnog materijala kod oba postupka su bili identični. Nepravilnosti poput većeg broja pora te povećane veličine pora mogle bi imati utjecaj u smanjenju mehaničkih svojstava zavarenog spoja. Na slici je također vidljivo da je zavareni spoj lijepo formiran, no nadvišenje zavarenog spoja ima nešto oštiji oblik koji bi u uvjetima dinamičkog opterećenja vjerojatno prije popustio, tj. dogodio bi se nastanak pukotine prije nego kod uzorka 1.



Slika 46. Makroizbrusak - Uzorak 3

Na slici 47. prikazan je makroizbrusak uzorka 10. Bitno je za napomenuti kako kod zavarivanja uzorka 10 nije bilo predobrade te da je uzorak zavaren u samo jednom prilazu što uvelike smanjuje troškove proizvodnje. Poroznost se također pojavljuje i kod uzorka 10 kao što je vidljivo na slici. Nadvišenje zavarenog spoja je maleno no dovoljno da se ne smanjuje poprečni presjek kao kod uzorka 2 tako da uzorak 10 prolazi vizualnu kontrolu i trebao bi imati jednaka mehanička svojstva kao i uzorak 1. kod uzorka 10 mjehurići koji se nalaze u metalu zavora manjeg su volumena i pojavljuju se u manjoj količini tako da ta činjenica ide u prilog kvalitete

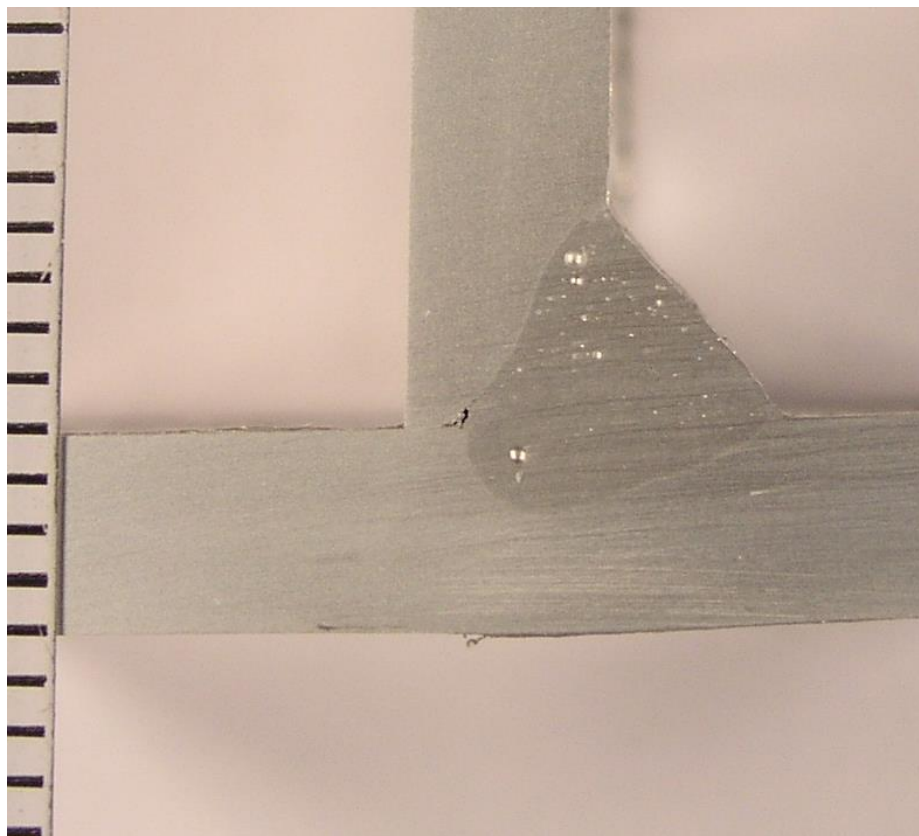
zavarenog spoja. Druge nepravilnosti osim poroznosti nisu uočene, a zavareni spoj ima estetski dobar izgled te se primjećuje klasični V izgled zavarenog spoja kao da je spoj izveden uz predobradu.



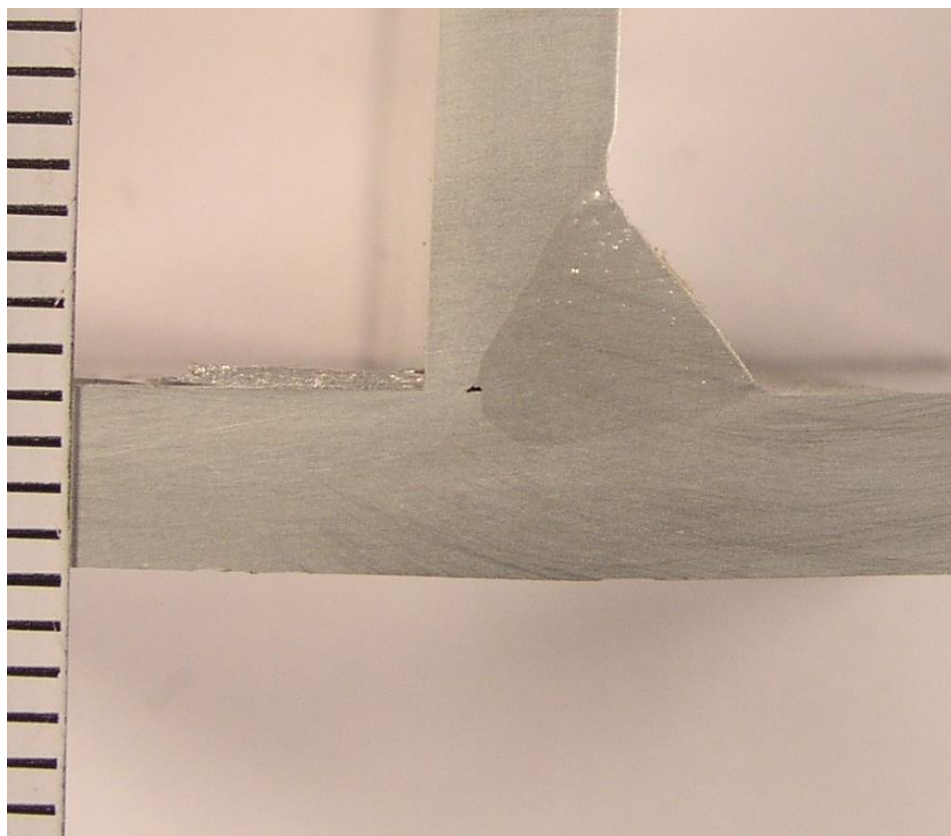
Slika 47. Makroizbrusak - Uzorak 10

Uzorci 8 i 9 su uzorci kutnog zavarenog spoja. Prema normi HR EN ISO 15614-2 za kutne zavarene spojeve potrebno je izrezati dva uzorka i to na početku zavarenog spoja i na kraju zavarenog spoja. Na sljedećim slikama prikazani su izrezani ispitni uzorci kutnih zavarenih spojeva. Slika 48. prikazuje makroizbrusak uzorka 8 na početku zavarenog spoja koji je izveden uz prethodnu predobradu, a slika 49. prikazuje isti uzorak ali na kraju zavarenog spoja. Kao što se može vidjeti na slikama 48. i 49. za različito mjesto zavarenog spoja različita je i pojava pora. Tako na početku zavarenog spoja dok je još temperatura osnovnog materijala manja uobičajeno je da dolazi do pojave više pora nego na kraju zavarenog spoja. Na slici 48. vidljivo je mnoštvo pora koje su također i poprilično velike te znatno oslabljuju zavareni spoj. Takav raspored pora također je vidljiv kod rendgenskog snimanja. Osim prevelike količine pora u zavarenom spoju dolazi do još jedne greške, a to je šupljina unutar materijala tj. kod korijenja

zavarenog spoja. Iako je zavareni spoj penetrirao dovoljno duboko u oba osnovna materijala šupljina koja je ostala zbog nedovoljnog protaljivanja može imati u realnim uvjetima katastrofalne posljedice. U uvjetima dinamičkog opterećenja ta šupljina bi predstavljala veoma dobru podlogu za nastajanje pukotine. U uvjetima izloženosti atmosferilijama u tu pukotinu može ući voda te zamrzavanjem izazvati pucanje osnovnog materijala ili metala zavara što je nedopustivo za bilo koju ozbiljniju konstrukciju. Iako veličina i količina pora predstavlja ozbiljnu prijetnju kvaliteti zavarenog spoja u ovom slučaju zaostala šupljina ima veći utjecaj jer se nalazi na cijeloj dužini zavarenog spoja kao što je vidljivo na slici 49. koja predstavlja kraj zavarenog spoja. Na kraju zavarenog spoja dolazi do velikog smanjenje količine i veličine poroznosti te je estetski oblik zavarenog spoja ljepši, no dolazi do pojave ugorina na gornjem dijelu zavarenog spoja. Ugorine mogu nastati zbog raznih posljedica kao što su velike jakosti struje zavarivanja, korištenje elektroda prevelikog promjera u odnosu na veličinu žljeba, nepravilnog načina vođenja vrha elektrode, predugačkog električnog luka i drugih razloga. U ovom slučaju to bi moglo biti ili nepravilno vođenje vrha žice (elektrode) ili predugačak električni luk. Razlog svođenja pogreške na te dvije posljedice je sljedeći. Ukoliko bi struja bila prejaka pojavila bi se ugorina na gornjoj i na donjoj strani zavarenog spoja, te bi ugorina bila na cijelom zavarenom spoju, a ne samo pred kraj zavarenog spoja. Isti ti razlozi vrijede za prevelik promjer žice te se to isključuje iz mogućnosti. Stvaranje ugorina na kraju zavarenog spoja navodi na zaključak kako je prilikom programiranja putanje zavarivanja programer nepravilno procijenio završnu točku ili se zbog unosa topline osnovni materijal deformirao te je time izazvana mala pogreška u vođenju žice i duljini električnog luka te je nastala ugorina ili rubni zajed. Iako je rubni zajed veoma mali on predstavlja velik nedostatak za zavareni spoj. Takav rubni zajed postaje koncentrador naprezanja i smanjuje mehanička svojstva zavarenog spoja.

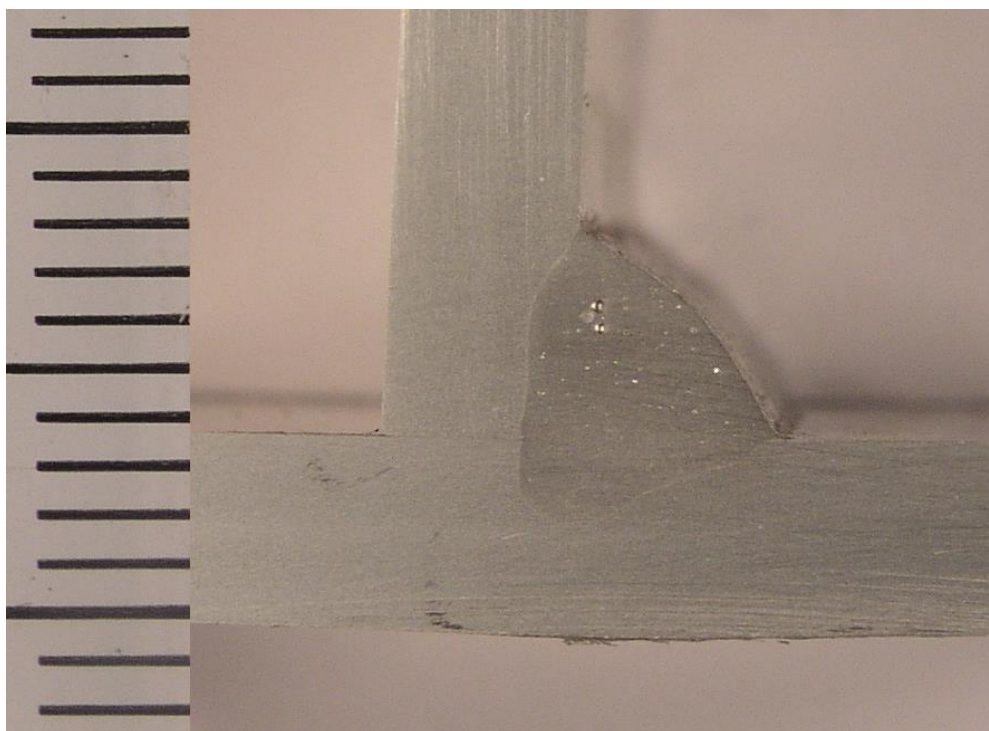


Slika 48. Makroizbrusak - Uzorak 8 - početak zavarenog spoja

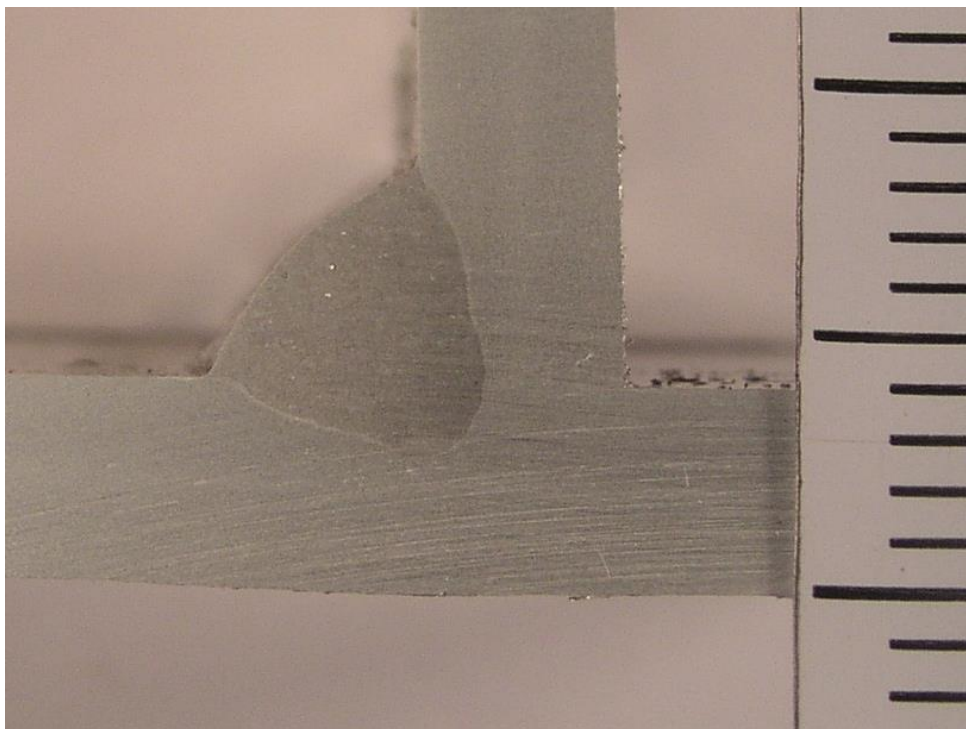


Slika 49. Makroizbrusak - Uzorak 8 - kraj zavarenog spoja

Na slikama 50. i 51. prikazani su makroizbrusci uzorka 9. Slika 50. prikazuje početak zavarenog spoja, a slika 51. kraj zavarenog spoja. Uzorak 9 isto kao i uzorak 8 ima veću količinu poroznosti na početku zavarenog spoja nego na kraju, no za razliku od uzorka 8 uzorak 9 ima manji broj poroznosti što je vidljivo i na rendgenskom ispitivanju. Također volumen mjehurića koji se vide na uzorku 9 je manji nego kod uzorka 8. To smanjenje količine i veličine poroznosti sigurno doprinosu poboljšanju kvalitete zavarenog spoja, a posljedica smanjenje poroznosti krije se vjerojatno u predpripremi uzoraka. Uzorci na kojima je provedena predpriprema imaju veću površinu koja se zavaruje te samim time i veće količine zaštitnog oksidnog sloja koji sudjeluje u procesu. Kako oksidni sloj izrazito lagano veže na sebe vlagu i jedan je od glavnih uzročnika nastanka poroznosti može se zaključiti kako je pojava poroznosti vjerojatnija kod uzoraka gdje je provedena predpriprema uzoraka. Iako uzorak 9 ima manje poroznosti i samim time bolja mehanička svojstva zavarenog spoja ima također nepravilnost koja mu ta svojstva smanjuje. Na poprečnom presjeku vidljivo je da kod uzorka 9 nije došlo do dovoljne penetracije zavarenog spoja u osnovni materijal, tj. dobiven je preplitak zavareni spoj. Estetski je izvana zavareni spoj korektnog izgleda, no kad se pogleda unutrašnjost može se vidjeti da je zavareni spoj previše plitak te kad bi ga podvrgnuli mehaničkom opterećenju došlo bi do pucanja zavarenog spoja na manjim silama. Najveći razlog tome je premala površina na kojoj se miješaju osnovni i dodatni materijal. Razlog nedovoljnoj penetraciji može biti premala struja zavarivanja ili prevelika brzina zavarivanja.



Slika 50. Makroizbrusak - Uzorak 9 - početak zavarenog spoja



Slika 51. Makroizbrusak - Uzorak 9 - kraj zavarenog spoja

7.3.3. Ispitivanje savijanjem

Za početak ispitivanja savijanjem, nakon izrade epruveta prema normi EN 5173, prvo je potrebno izračunati vrijednost promjera trna kojim će se provoditi ispitivanje te razmak između valjaka kojima će se provoditi ispitivanje. Dimenzioniranje trna propisano je normom EN ISO 15614-2 te se izračunava prema sljedećoj formuli:

$$d = \frac{100 \cdot t_s}{A} - t_s \quad (1)$$

Gdje je:

d – promjer trna, mm

t_s – debljina epruvete, mm

A – istezljivost osnovnog materijala, %

Ako se zna iz atesta osnovnog materijala da je istezljivost 16% te je izmjerena debljina materijala 4 mm, nakon uvrštavanja svih vrijednosti u formulu dobiva se da promjer trna iznosi 21 mm. Vrijednost koja je dobivena izračunom zaokružuje se na okruglu vrijednost, a to je 20 mm.

$$d = \frac{100 \cdot 4}{16} - 4 = 21 \text{ mm}$$

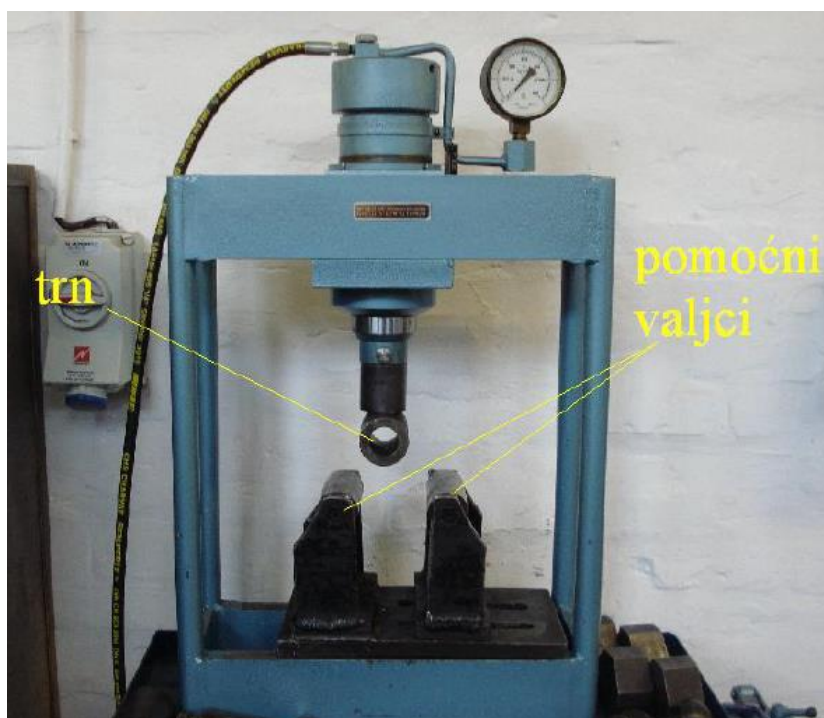
Prema normi ISO 5173 razmak između valjaka iznosi:

$$d + 2 \text{ ts} < l \leq d + 3 \text{ ts}$$

$$20 + 8 < l \leq 20 + 12$$

Odabrani razmak iznosi 30 mm.

Na slici 52. prikazan je izgled naprave na kojoj se provodi ispitivanje. Kao što se vidi na slici naprava se sastoji od postolja na koji su pričvršćena dva pomoćna valjka te hidrauličkog cilindra na kojeg je stegnut trn. Kod ispitivanja epruveta se postavlja na pomoćne valjke te se centrira tako da trn pritišće epruvetu na mjestu zavarenog spoja. Prema normi ispitivanje se provodi sve dok se ne osjeti na epruveti pukotina te se u tom trenutku prekida ispitivanje, mjeri se pukotina i kut do kojeg se savila epruveta. Ispitivanje se provodi na 4 pripremljene epruvete od svakog uzorka i to tako da se sa dvije epruvete ispituje korijen, a s druge dvije lice zavarenog spoja.

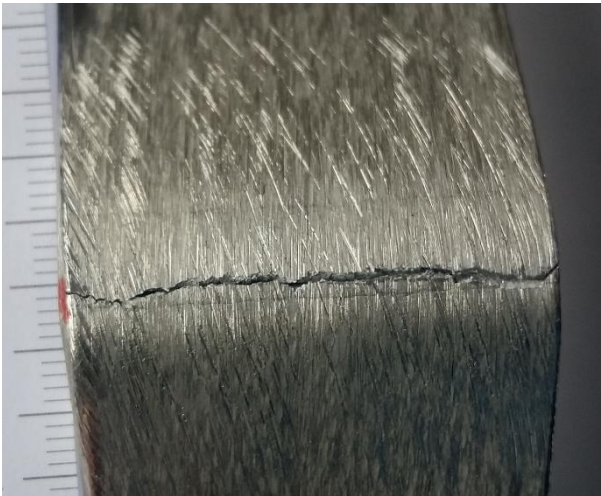


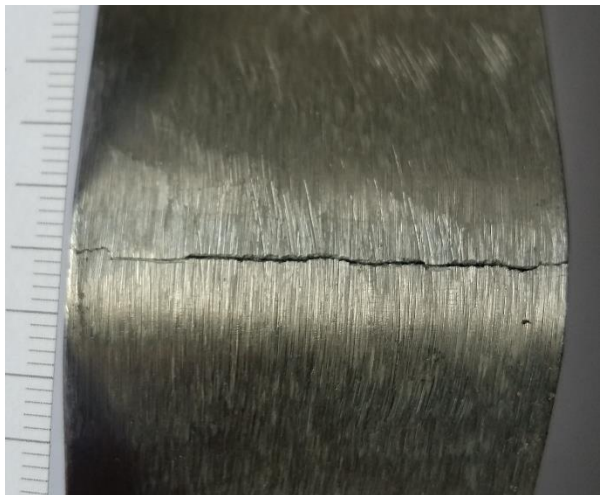


Slika 52. Naprava za ispitivanje savijanjem

Rezultati ispitivanja prikazani su u sljedećim tablicama, a brojčane vrijednosti dobivenih kutova za pojedinu epruvetu prikazane su u tablicama ispod slika.

U tablici 11. prikazane su slike epruveta načinjenih iz uzorka 1, a u tablici 12. prikazane su brojčane vrijednosti izmjerenih kutova.

Tablica 11. Rezultati ispitivanja savijanjem – Uzorak 1

Uzorak 1	
Lice zavarenog spoja	Korijen zavarenog spoja
 <p>Epruveta 1-1</p>	 <p>Epruveta 1-3</p>
 <p>Epruveta 1-6</p>	 <p>Epruveta 1-4</p>

Tablica 12. Brojčane vrijednosti kutova – Uzorak 1

	Epruveta 1-1	Epruveta 1-6	Epruveta 1-3	Epruveta 1-4
$\alpha, ^\circ$	51°	35°	48°	58°





Bitno je za napomenuti kako je kod ispitivanja epruveta 1-4 i 1-3 došlo do trenutnog loma te se epruveta prepolovila. Takvo pucanje epruvete nije pogodno za zavareni spoj jer dokazuje iznimno malu duktilnost. Sve epruvete kod uzorka 1 kao što je vidljivo na slikama imaju pukotine na sebi te zavareni spoj ne zadovoljava, no potrebno je primijetiti kako su pukotine nastale na prijelazu između osnovnog materijala i zavarenog spoja što znači da metal zavara

ima dovoljno dobru duktilnost, no prebrzo hlađenje u zoni spajanja osnovnog i dodatnog materijala dovelo je do krhke strukture.

Kod ispitivanja epruveta načinjenih od uzorka 2 kod svih epruveta je došlo do krhkog loma na iznimno malim kutovima kao što je i očekivano. Puknuća su nastupila po središtu zavarenog spoja što ukazuje da tehnologija i parametri zavarivanja nisu dobri te da zavareni spoj ne zadovoljava. Slike i rezultati ispitivanja nisu navedeni u radu zbog toga jer su irelevantni za daljnja ispitivanja i donošenje zaključka.

U tablici 13. prikazane su slike epruveta načinjenih iz uzorka 3, a u tablici 14. prikazane su brojčane vrijednosti izmjerenih kutova.

Tablica 13. Rezultati ispitivanja savijanjem - Uzorak 3

Uzorak 3	
Lice zavarenog spoja	Korijen zavarenog spoja
	
Epruveta 3-2	Epruveta 3-1
	
Epruveta 3-6	Epruveta 3-4



Tablica 14. Tablica 12. Brojčane vrijednosti kutova – Uzorak 3

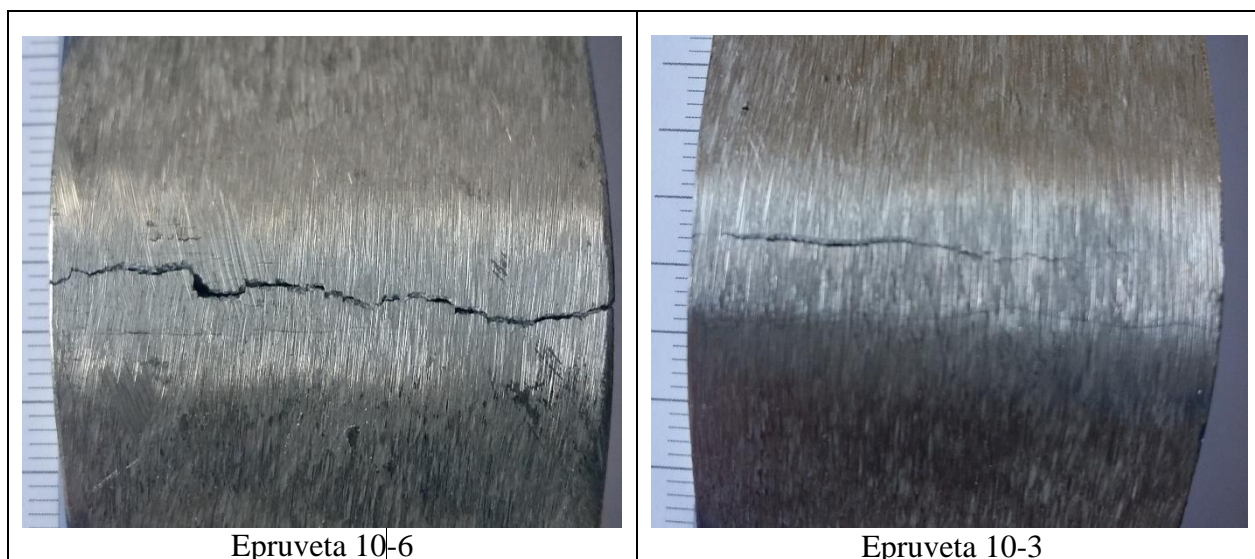
	Epruveta 3-2	Epruveta 3-6	Epruveta 3-1	Epruveta 4-4
α	42°	37°	17°	47°

Kod ispitivanja epruveta načinjenih od uzorka 1 nije došlo do trenutnih puknuća kod nijedne epruvete. Prema slikama vidljivo je kako je do puknuća došlo jednako kao i kod epruveta uzorka 1 na spoju metala zavara i osnovnog materijala. Dakle zavareni spoj ne zadovoljava ni kod jedne epruvete uzorka 3, no metal zavarenog spoja pokazuje zadovoljavajuću duktilnost te je i kod ovih epruveta problem parametara kod zavarivanja te prebrzo hlađenje zavarenog spoja. Kod izmjerenih vrijednosti kutova vidljiva je jedna vrijednost koja značajno odstupa, a to je kod epruvete 3-1. Kod te epruvete bila je primjetna deformacija epruvete zbog unesene topline prilikom zavarivanja, a ispitivana je u suprotnu stranu od nastale deformacije. Zbog tih razloga pojava pukotine i prestanak ispitivanja dogodio se na iznimno maloj vrijednosti kuta.

U tablici 15. prikazane su slike epruveta načinjenih iz uzorka 10, a u tablici 16. prikazane su brojčane vrijednosti izmjerenih kutova.

Tablica 15. Rezultati ispitivanja savijanjem - Uzorak 10

Uzorak 3	
Lice zavarenog spoja	Korijen zavarenog spoja
	
Epruveta 10-5	Epruveta 10-2



Tablica 16. Brojčane vrijednosti kutova – Uzorak 10

	Epruveta 10-5	Epruveta 10-6	Epruveta 10-2	Epruveta 10-3
α	45°	53°	60°	56°

Ispitivanjem epruveta napravljenih od uzorka 10 dolazi se do različitih rezultata za lice zavarenog spoja i korijen zavarenog spoja. Ispitivanjem epruvete 10-6 dolazi do trenutnog loma epruvete i to kao što je prikazano na slici lom prolazi kroz sam zavareni spoj. Kod epruvete 10-5 nije nastupio trenutni lom no zavareni spoj također je puknuo po sredini što ukazuje na slabu duktilnost zavarenog spoja. Kod ispitivanja korijena zavarenog spoja utvrđeno je da je zavareni spoj puknuo na spoju s osnovnim materijalom. Takvo puknuće dovodi do zaključka kako je metal zavarenog spoja u korijenu zavarenog spoja dovoljno duktilan, a na licu zavarenog spoja nedovoljno. Razlog takvom ponašanju vjerojatno je prebrzo hlađenje zavarenog spoja te nastajanje krhke strukture.

7.3.4. Ispitivanje kidanjem

Kako bi se proveo statičko vlačni pokus tj. ispitivanje kidanjem potrebno je posjedovati stroj zvan kidalica. Na tim strojevima epruvete se kontinuirano vlačno opterećuju do loma, te se kontinuirano mjeri sila i produljenje epruvete. Izmjerena sila i produljenje epruvete tvore dijagram „sila-produljenje“. Opterećenje koje se provodi kod ispitivanja ostvaruje se hidraulički ili mehanički. Za potrebe ispitivanja potrebno je pripremiti epruvete koje se pripremaju prema normi ISO 4136.

Ispitivanje statičko vlačnim pokusom provedeno je na kidalici EU 40 MOD, koja je prikazana na slici 53., u laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava, Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Norma koja se koristila za ispitivanje je EN 10002. Na slici 53. također je vidljivo namještanje ispitnih uzoraka prije početka kidanja.



Slika 53. Kidalica EU 40 MOD

Rezultati ispitivanja bilježeni su u računalu te su iscrtani dijagrami za svaki od ispitnih uzoraka. Svaka zavarena ploča ima dva uzorka koji su izrezani na različitim dijelovima ploče i sukladno tome označeni. Rezultati ispitivanja prikazani su na sljedećim stranicama.

Na slici 54. prikazana je epruveta 1-2 na kojem se vidi nepravilno puknuće epruvete. Veći dio puknuća očekivano se nalazi u području zone utjecaja topline, a manji dio puknuća prolazi kroz zavareni spoj. Razloga takvom puknuću ima nekoliko no najvjerojatniji je taj da se unutar zavarenog spoja nalaze sitne pore koje su uzrokovale oslabljenje zavarenog spoja i samim time puknuće u predjelu zavarenog spoja. Vlačna čvrstoća zavarenog uzorka iznosi $227,04 \text{ N/mm}^2$.



Slika 54. Epruveta 1-2

Prema normi EN ISO 15614-2 vlačna čvrstoća zavarenog uzorka zadovoljava ako je ispunjen uvjet:

$$R_m(w) = R_m(pm) * T \quad (2)$$

Gdje je:

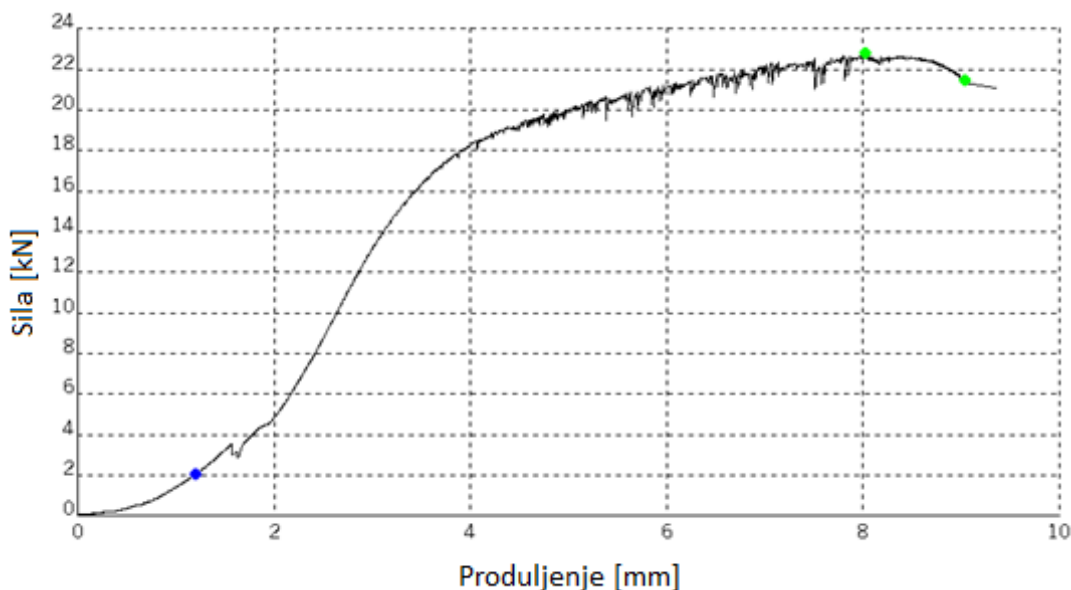
$R_m(w)$ - vlačna čvrstoća zavarenog uzorka; N/mm^2

$R_m(pm)$ - vlačna čvrstoća osnovnog materijala; N/mm^2

T - faktor efikasnosti spoja (prema normi HRN EN ISO 15614-2 za Al-Mg vrijedi $T = 1$)

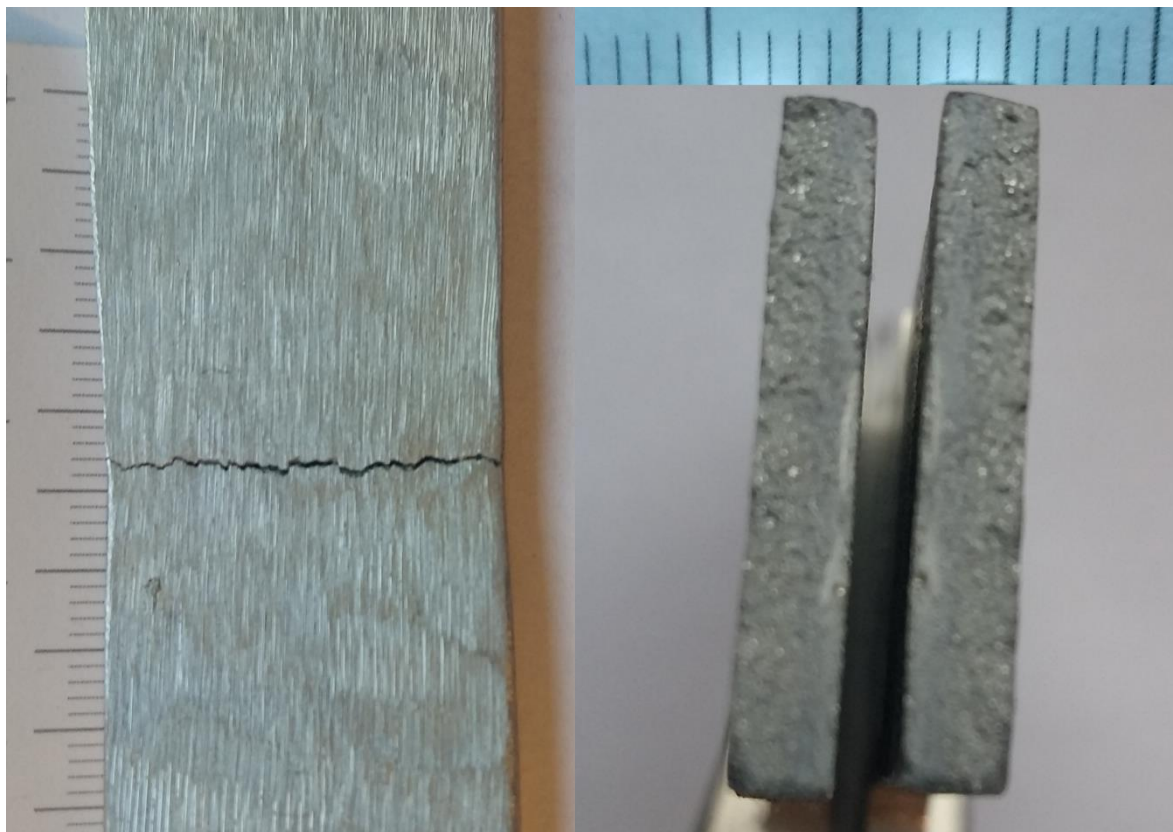
Prema certifikatu osnovnog materijala vlačna čvrstoća osnovnog materijala mora biti unutar granica od 220 do 260 N/mm^2 . Sukladno formuli (1) i dobivenim rezultatima dolazi se do zaključka kako se zavareni spoj nalazi unutar granica tolerancije te sukladno tome zavareni spoj zadovoljava.

Na slici 55. prikazan je dijagram sila-istezanje za ispitnu epruvetu.



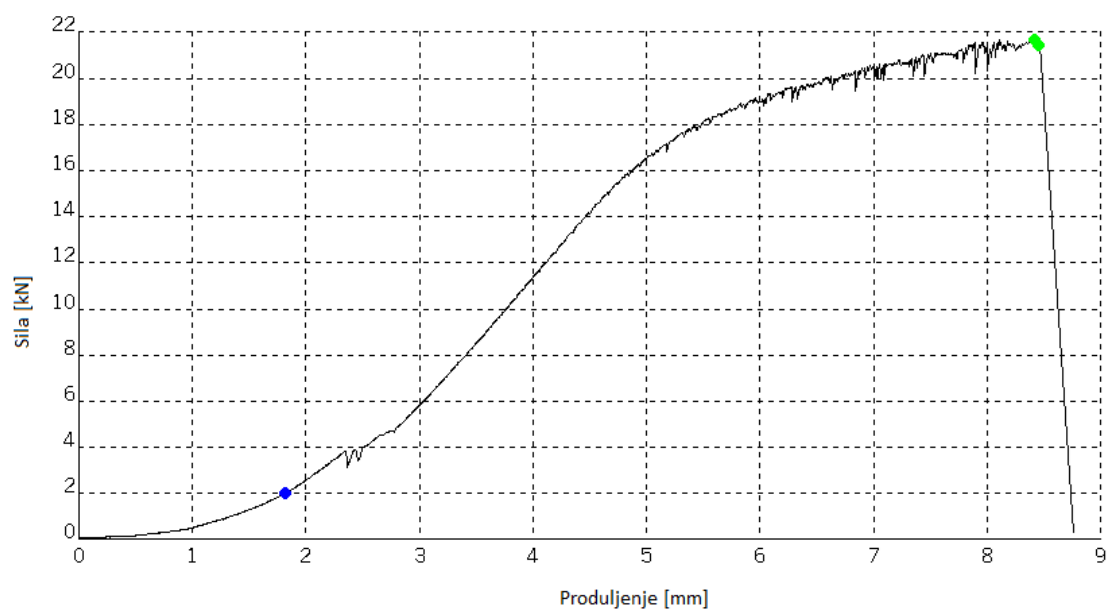
Slika 55. Dijagram sila-produljenje - epruveta 1-2

Sljedeća je ispitana epruveta 1-5. puknuće epruvete prikazano je na slici 56. Iz slike je vidljivo kako se puknuće dogodilo na granici između osnovnog materijala i metala zavora. Takvo puknuće upućuje na nedovoljnu protaljenost osnovnog i dodatnog materijala, a moguće je i prebrzo hlađenje ispitnih uzoraka. Daljnjom analizom puknuća može se vidjeti kako zavareni spoj u svojoj strukturi ima niz sitnih pora koje iako se učestalo pojavljuju kod zavarivanja aluminijskih legura smanjuju mehanička svojstva zavarenog spoja. Vlačna čvrstoća koja je dobivena ispitivanjem iznosi $227,26 \text{ N/mm}^2$ što je skoro pa ista vrijednost kao i kod uzorka 1-2. Sukladno formuli (1) i granicama od 220 do 260 N/mm^2 u kojima zavareni spoj treba biti prema normi može se zaključiti da zavareni spoj epruvete 1-5 zadovoljava.



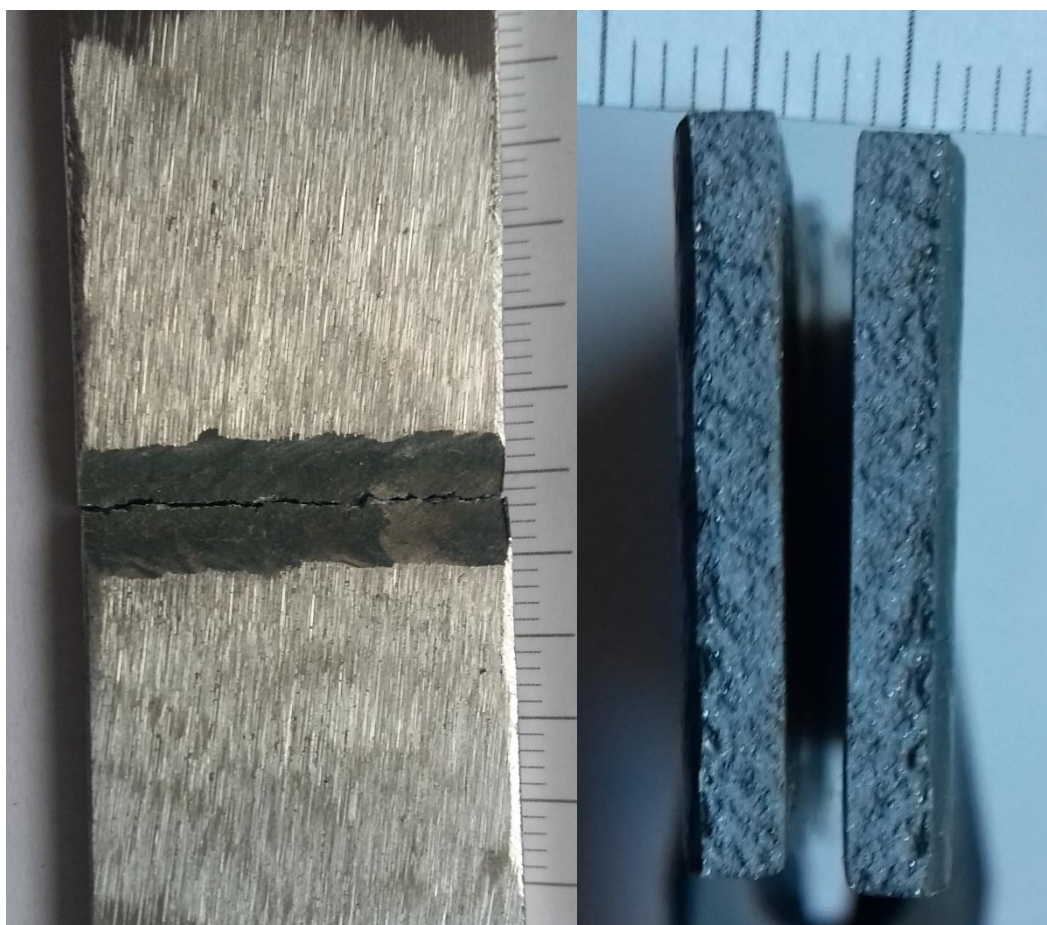
Slika 56. Epruveta 1-5

Dijagram sila-produljenje za epruvetu 1-5 prikazan je na slici 57. Iz dijagrama se može vidjeti da slično kao i kod epruvete 1-2 do puknuća dolazi uz relativno malo produljenje, a maksimalna sila koja je potrebna vidljivo je manja nego kod uzorka 1-2 i to za nešto više od 1 kN.

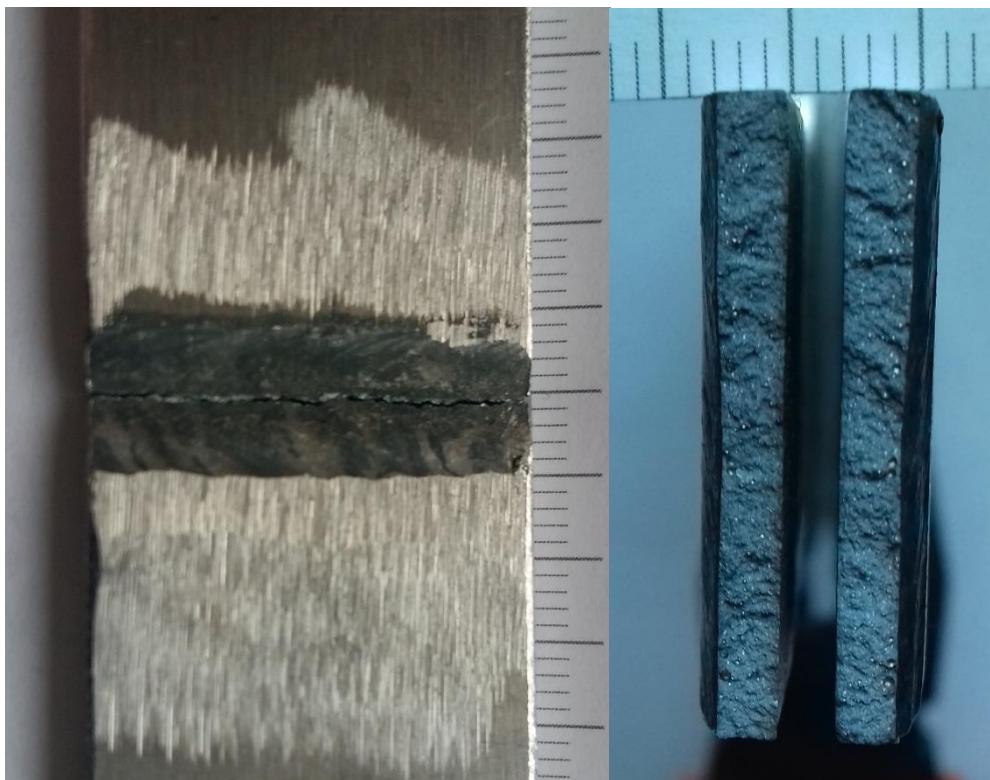


Slika 57. Dijagram sila-produljenje - epruveta 1-5

Epruvete 2-5 i 2-5 prikazane su na slikama 58. i 59. Ti uzorci nisu zadovoljili vizualno ispitivanje zbog nedovoljnog nadvišenja te je zbog toga očekivano da imaju puno lošije rezultate na statičko vlačnom ispitivanju. Zbog smanjenog poprečnog presjeka u području zavora očekivano je da epruvete puknu na tom dijelu uz smanjenu vlačnu čvrstoću. Kao što je pretpostavljeno rezultati ispitivanja vidljivi na slikama dokazuju kako se puknuće dogodilo u onom dijelu u kojem je očekivano te da je vlačna čvrstoća znatno manja od minimalne granice i za epruvetu 2-2 iznosi $170,3 \text{ N/mm}^2$, a za epruvetu 2-5 iznosi $166,41 \text{ N/mm}^2$. Te vrijednosti su ispod minimalne granice od 220 N/mm^2 . Također je vidljivo da u zavarenom spoju ima mnoštvo sitnih pora koje su još dodatno smanjile mehanička svojstva.

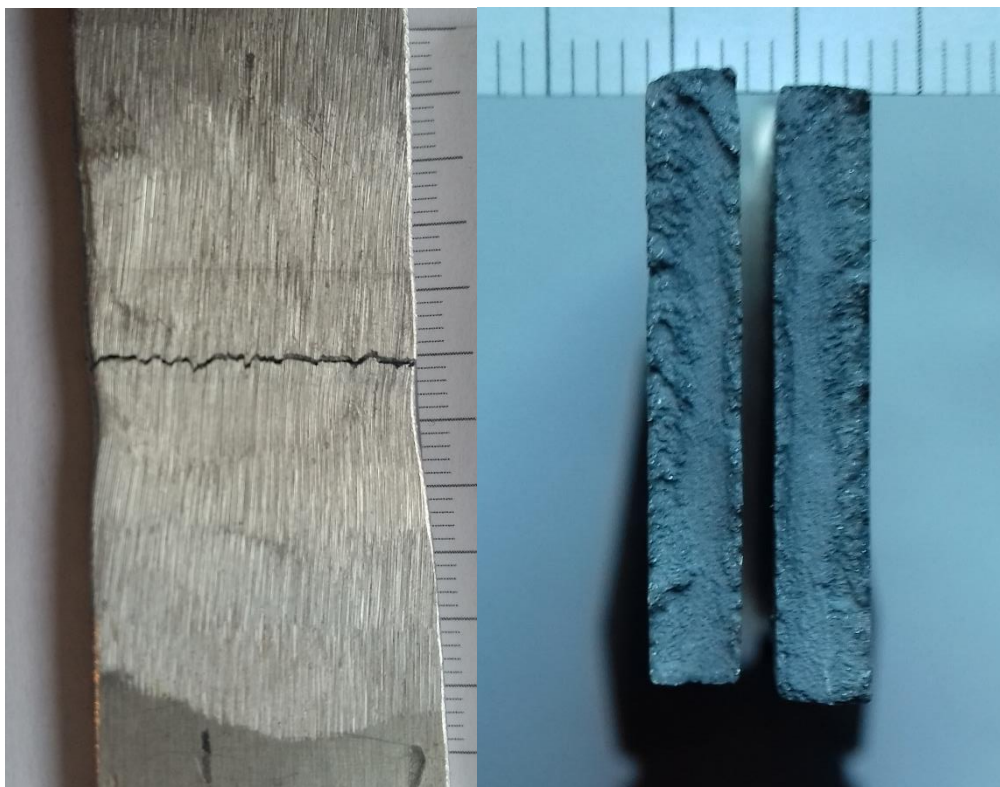


Slika 58. Epruveta 2-2



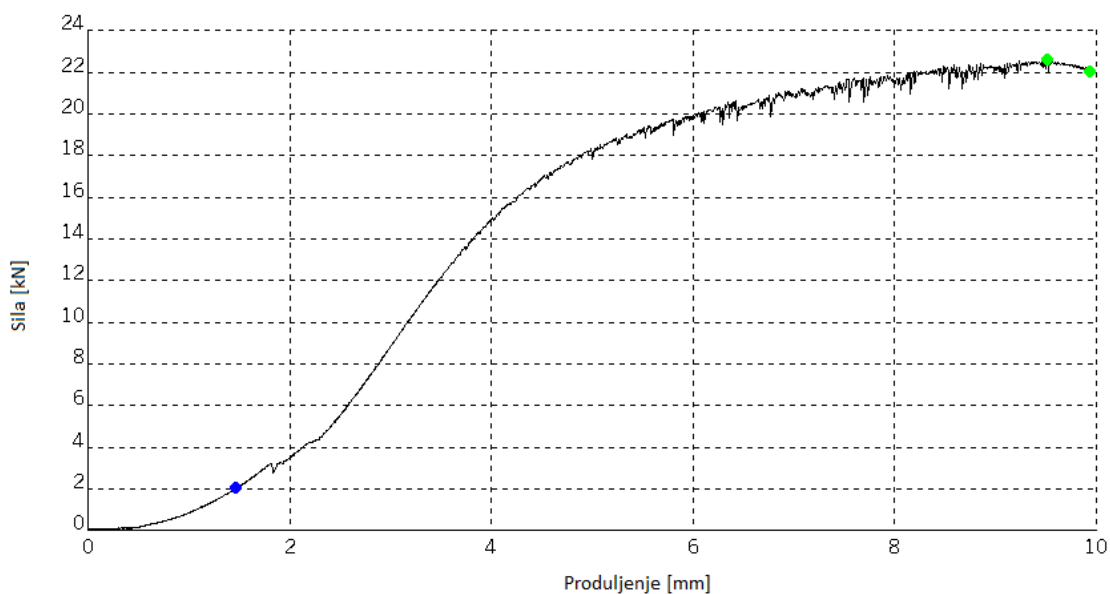
Slika 59. Epruveta 2-5

Sljedeća je ispitana epruveta 3-3. Kao što je vidljivo na slici 60. epruveta 3-3 pukla je u području zavarenog spoja i to na rubu zavarenog spoja i osnovnog materijala. Takvo pucanje epruvete upućuje na nedovoljno miješanje osnovnog i dodatnog materijala te na veliko smanjenje mehaničkih svojstava na tom području. Kao što je na slici vidljivo i u tom zavarenom spoju se nalazi određeni broj sitnih pora koje su također doprinijele smanjenju mehaničkih svojstava zavarenog spoja. Kako je na epruveti vidljivo da se puknuće dogodilo u osnovnom materijalu također se može zaključiti da je razlog tome premali unos topline u materijal te prebrzo hlađenje osnovnog materijala koje je uzrokovalo degradaciju mehaničkih svojstava osnovnog materijala. Iako se testom vidi da su zavarivanjem smanjena svojstva materijala rezultat vlačne čvrstoće iznosi $230,75 \text{ N/mm}^2$ što je nešto više od rezultata kod uzoraka 1-2 i 1-5. Ako se taj rezultat uvrsti u formulu (1) i uzmu u obzir dopuštene granice vlačne čvrstoće od 220 do 260 N/mm^2 dolazi se do zaključka kako uzorak 3-3 zadovoljava.



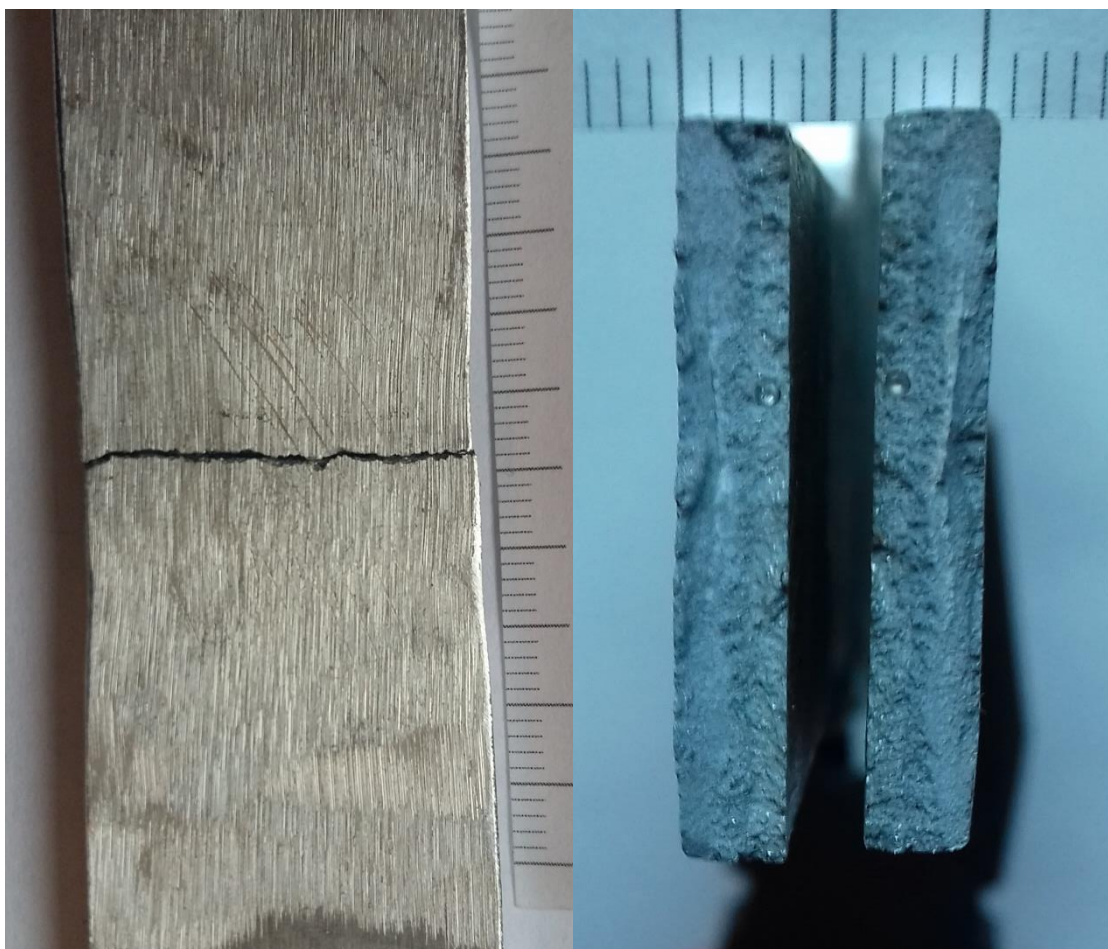
Slika 60. Epruveta 3-3

Iz dijagrama sila-produljenje koji je prikazan na slici 61. vidljivo je da dolazi do relativno malog produljenja prije puknuća no ipak do nešto većeg od produljenja kod epruveta 1-2 i 1-5. Sila koja je potrebna za kidanje uzorka je relativno velika uspoređujući s ostalim provedenim ispitivanjima.



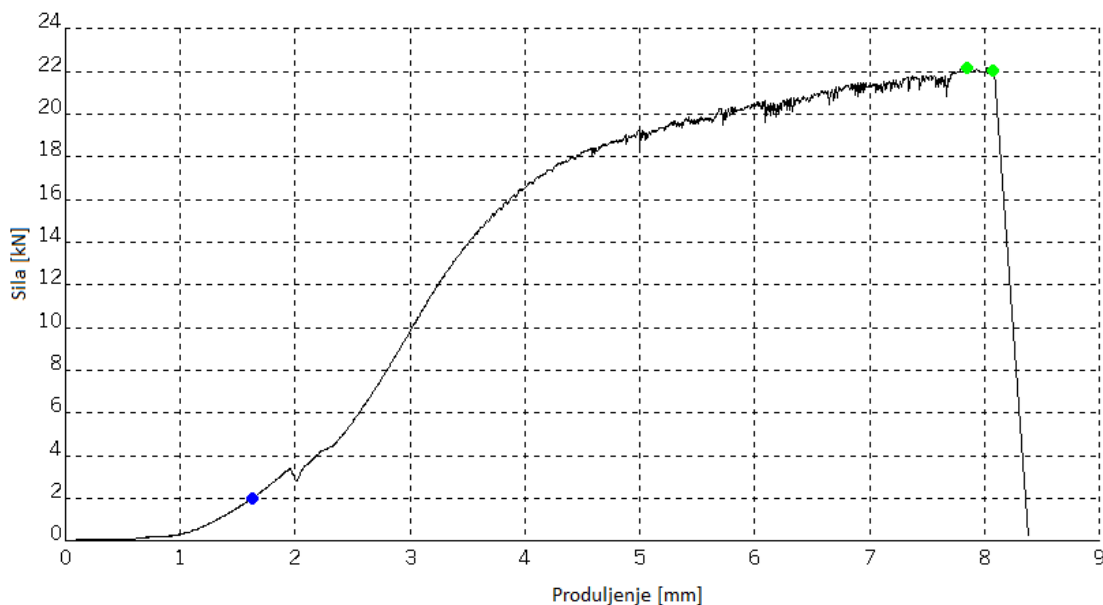
Slika 61. Dijagram sila-produljenje - epruveta 3-3

Uzorak 3-5 koji je prikazan na slici 62. ne razlikuje se mnogo od uzorka 3-3. Puknuće koje je nastupilo nalazi se na granici zavarenog spoja i osnovnog materijala. Promatranjem mjesta puknuća vidljivo je puknuće djelom u osnovnom materijalu, a dijelom u zavarenom spoju. Takvo mjesto puknuća tipično je kod zavarenih spojeva u kojima nije došlo do dovoljne izmiješanosti osnovnog i dodatnog materijala što znači da nije unesena dovoljna količina energije u materijal te da je nastupilo prebrzo hlađenje. Osim degradacije mehaničkih svojstava premalim unosom topline vidljive su pore unutar zavarenog spoja. Iako su one učestale u ovom zavarenom spoju su nešto veće što je rezultiralo daljnjim smanjenjem mehaničkih svojstava. To smanjenje mehaničkih svojstava očituje se i u statičko vlačnom ispitivanju. Rezultat koji je dobiven ispitivanjem iznosi $226,35 \text{ N/mm}^2$ što je dosta manje nego kod epruvete 3-3. budući da bi jedina razlika između te dvije epruvete trebala biti količina pora lako je za zaključiti da pore imaju značajan utjecaj na vlačnu čvrstoću. Usprkos smanjenim mehaničkim svojstvima dobiveni rezultati su prolazni jer i smanjena vlačna čvrstoća zadovoljava uvjete propisane normom tj. dobivena vlačna čvrstoća je unutar granica od 220 do 260 N/mm^2 .



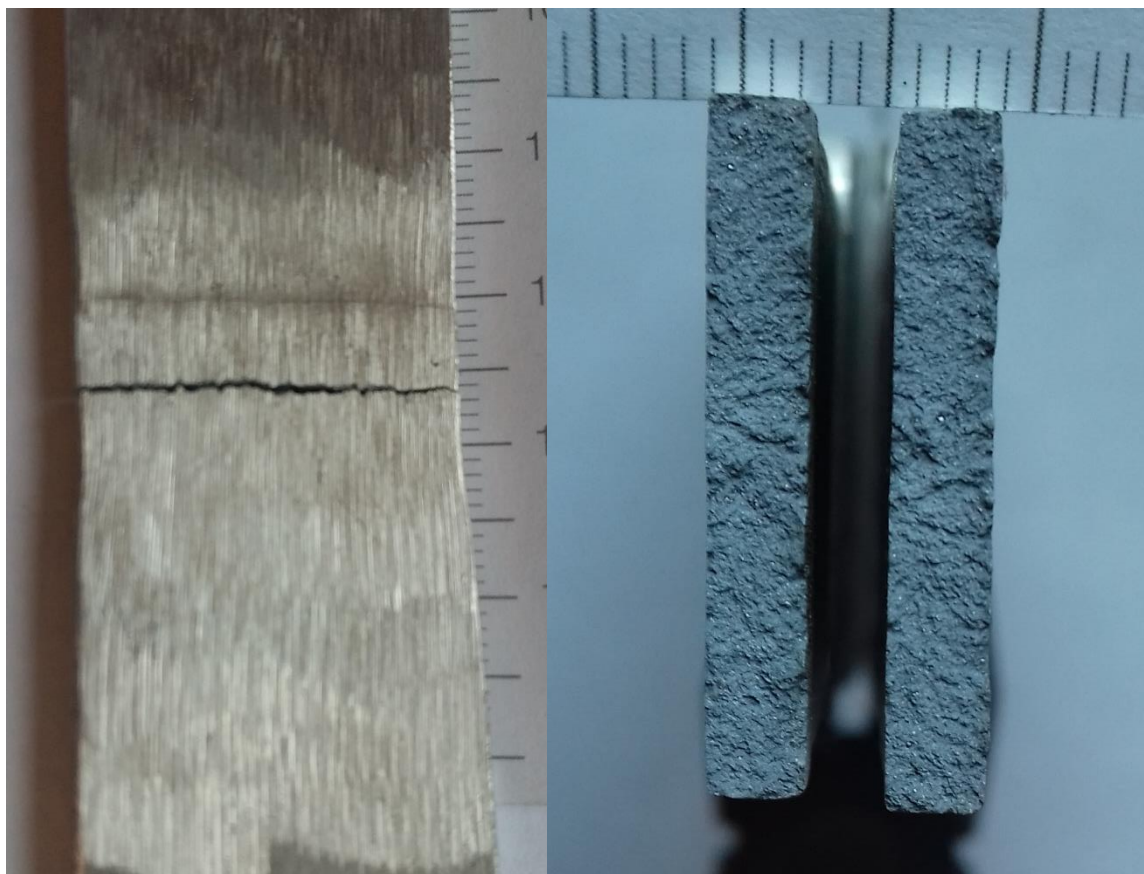
Slika 62. Epruveta 3-5

Na slici 63. prikazan je sila-produljenje dijagram za epruvetu 3-5. Na dijagramu je vidljivo kako je smanjeno produljenje u usporedbi s uzorkom 3-3 te kako je maksimalna sila nešto manja nego kod uzorka 3-3.



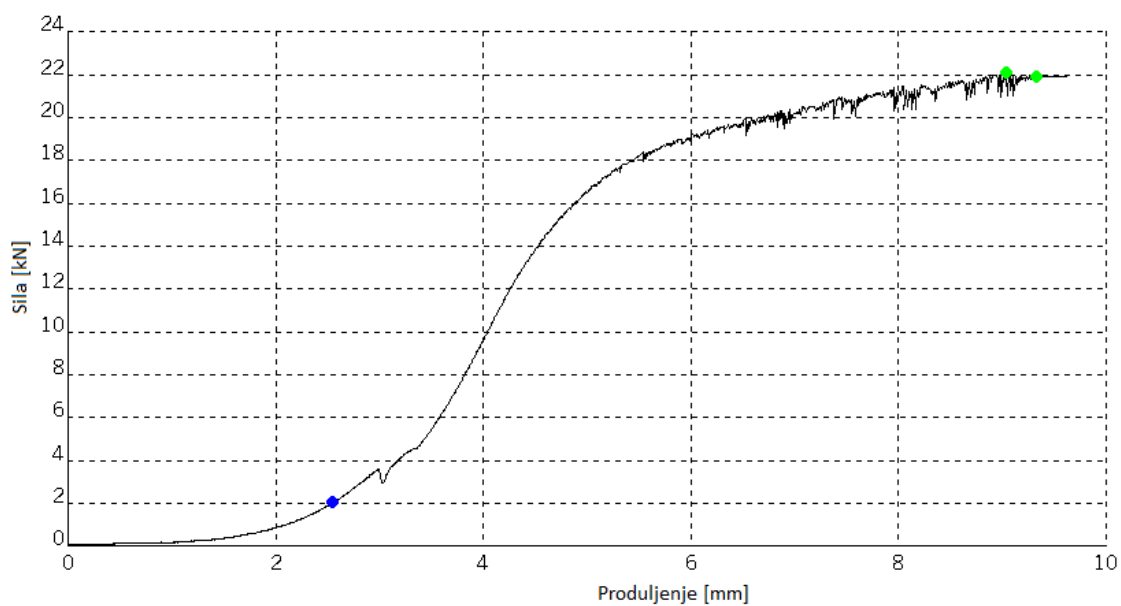
Slika 63. Dijagram sila-produljenje - epruveta 3-5

Sljedeće ispitivanje provedeno je na epruveti 10-4. Izgled puknuća prikazan je na slici 64. Iz izgleda je vidljivo da se puknuće dogodilo kao i na ostalim epruvetama na prijelazu između osnovnog materijala i zavarenog spoja. Iako je puknuće nastupilo na sličnom mjestu kao i kod epruveta 3-3 i 3-5 u presjeku puknuća nije vidljiv osnovni materijal nego samo materijal zavarenog spoja. Takav izgled puknuća upućuje da je došlo do dovoljnog miješanja osnovnog i dodatnog materijala te da je zavareni spoj najslabije mjesto. Izgled zavarenog spoja za razliku od ostalih ispitnih epruveta pokazuje da je zavareni spoj uzorka 10 izveden s veoma malim brojem pora što ukazuje na bolju tehniku zavarivanja te na kvalitetnije odabrane parametre. Kao što je već prije navedeno zavareni spoj uzorka 10 izveden je bez predobrade pa je površina prekrivena oksidnim slojem bila manja nego kod ostalih uzoraka što je rezultiralo smanjenim brojem pora u zavarenom spoju. Rezultat koji je dobiven ispitivanjem govori da vlačna čvrstoća epruvete 10-4 iznosi $231,44 \text{ N/mm}^2$ što je najveća dobivena vlačna čvrstoća. Naravno kada se dobivena vlačna čvrstoća uvrsti u formulu (1) i kada se uzmu propisane granice u kojima se treba nalaziti zavareni spoj od 220 do 260 N/mm^2 može se zaključiti kako zavareni spoj epruvete 10-4 zadovoljava.



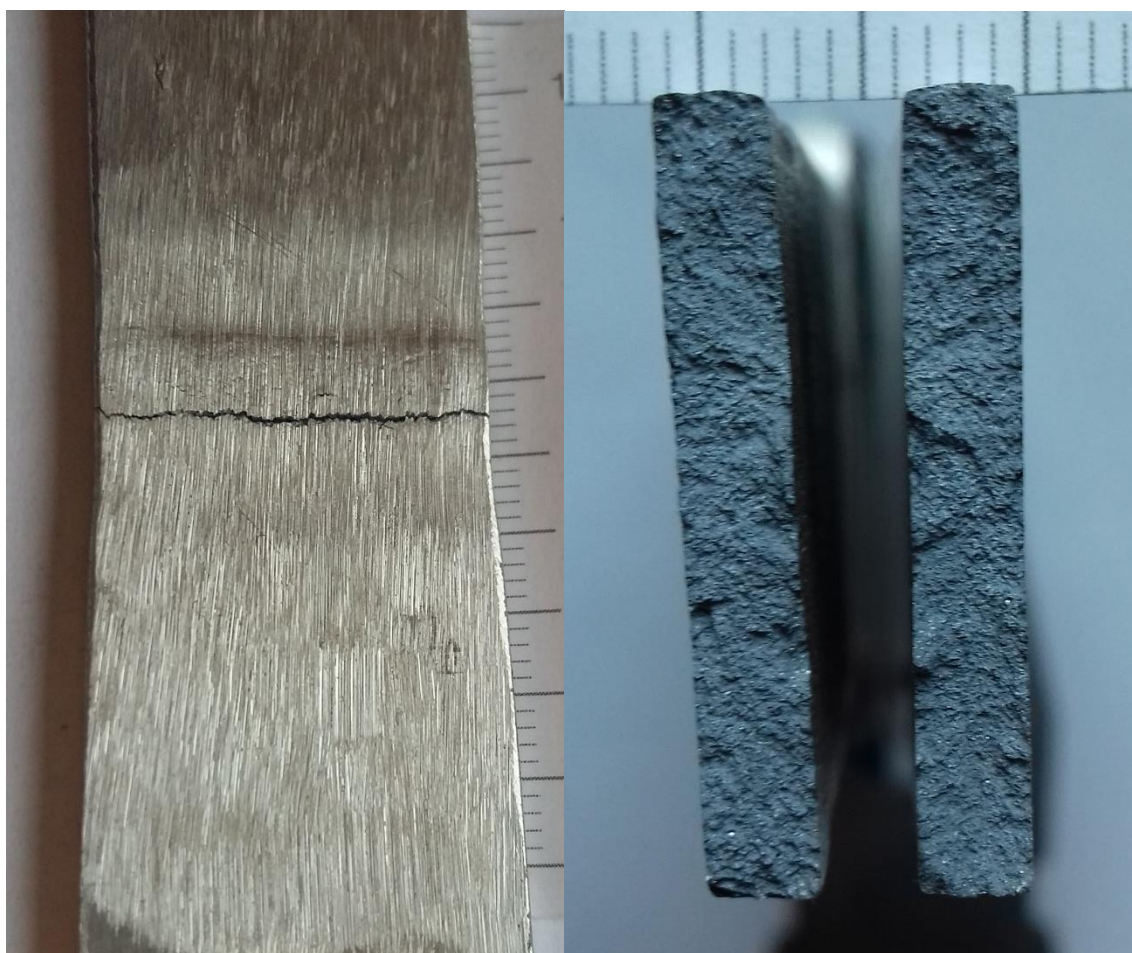
Slika 64. Epruveta 10-4

Dijagram sila-produljenje prikazan na slici 65. prikazuje odnos između sile i produljenja izazvanog tom silom. Produljenje koje se vidi na dijagramu relativno je malo no ako se usporedi s ostalim epruvetama vidi se da je među većim produljenjima.



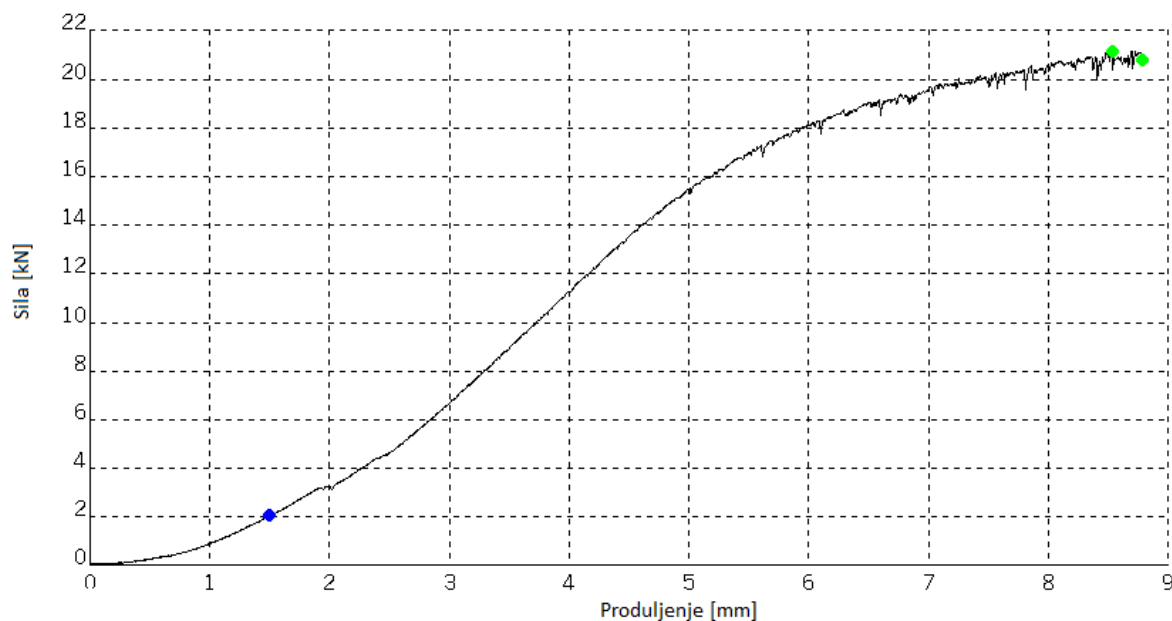
Slika 65. Dijagram sila-produljenje - epruveta 10-4

Ispitivanje epruvete 10-7 polučilo je slične rezultate kao kod epruvete 10-4. Rezultati ispitivanja vidljivi su na slici 66. Na slici je vidljivo da se puknuće dogodilo u zavarenom spoju no na rubu zavarenog spoja gdje se miješaju osnovni i dodatni materijal. Pošto u prijelomu nije vidljiv osnovni materijal zaključak je isti kao i kod epruvete 10-4, a to bi bilo da je došlo do dovoljnog miješanja osnovnog i dodatnog materijala te da je zavareni spoj najslabije mjesto. Jednako kao i na epruveti 10-4 udio pora u zavarenom spoju je veoma malen te su prostim okom jedva primjetne. Rezultati ispitivanja nešto su lošiji nego kod epruvete 10-4 no i dalje su bolji od većine ostalih ispitnih epruveta. Vlačna čvrstoća epruvete 10-7 iznosi $228,53 \text{ N/mm}^2$ te ako se uvrsti u formulu (1) i uzmu dopuštene granice od 220 do 260 N/mm^2 onda dolazimo do zaključka da zavareni spoj zadovoljava.



Slika 66. Epruveta 10-7

Na slici 67. prikazan je dijagram sila-produljenje za epruvetu 10-7. Iz dijagrama je vidljivo da je produljenje kao i kod ostalih uzoraka relativno malo no kada se uzorci usporede međusobno dolazi se do zaključka kako je produljenje normalno za taj zavareni spoj.



Slika 67. Dijagram sila-produljenje - epruveta 10-7

Iznenadjuće je da je kod skoro svih uzoraka došlo do pucanja epruveta uz relativno malo produljenje. Pucanje epruveta događa se naglo i bez velike plastične deformacije. Razlog maloj deformaciji i krhkog loma je poboljšana struktura aluminijske legure. Puknuće epruveta u području zavarenog spoja izrazito je zabrinjavajuće te bi trebalo promijeniti parametre u tehnologiji zavarivanja kako bi se otkrili razlozi takvog ponašanja. Osim malog produljenja i pucanja po zavarenom spoju potrebno je konstatirati da svi zavareni spojevi iako zadovoljavaju normu, imaju vlačnu čvrstoću blizu donje granice što je nepovoljno i potrebno je istražiti na sljedećim ispitivanjima. Za sljedeća ispitivanja potrebno je provesti prilagođavanje brzine zavarivanja te je potrebno zavarene spojeve sporije hladiti kako bi se ustanovio pravi uzrok smanjenja mehaničkih svojstava zavarenih spojeva.

Analizom rezultata ispitnih epruveta može se zaključiti da izostavljanjem predobrade kod zavarivanja se postižu jednako dobri ako ne i bolji rezultati nego kod predobrade epruveta. Sitne korekcije u parametrima mogle bi polučiti još bolje rezultate kod ispitnih uzoraka gdje nije izvedena predobrada što bi značilo značajne uštede u proizvodnom procesu.

8. ZAKLJUČAK

Stalna industrijalizacija i unaprjeđenje proizvodnje dovelo je do otkrića mnoštva novih materijala i njihovih usavršavanja u još bolje i isplativije materijale. Kao što je vidljivo iz prethodnog teksta aluminijske legure su jedan od tih materijala. Nakon otkrića aluminija svake godine raste proizvodnja aluminijskih legura i sada se nalazi među najučestalijim materijalima u svim granama industrije. U prethodnom tekstu naveden je niz prednosti koje pružaju legure aluminija, ali također i neki od nedostataka. Robotizacijom procesa zavarivanja postižu se značajne uštede u proizvodnji, a samim time i uštede u gotovom proizvodu. Samo robotizacija uspješno pojeftinjuje masovnu proizvodnju no potrebno je težiti daljnjem poboljšanju i tražiti optimalna rješenja unutar tehnologije zavarivanja. Kao što je prikazano u eksperimentalnom dijelu potrebno je optimizirati brzinu zavarivanja, broj prolaza i smanjiti ili ukinuti sve predradnje koje nisu neophodne za proces zavarivanja.

U eksperimentalnom dijelu optimizacija procesa ponajviše je vidljiva kod izostavljanja predobrade i zavarivanja uzorka 10 u jednom prolazu, no ta optimizacija nije dala zadovoljavajuće rezultate na nekim poljima ispitivanja. Ispitivanja koja su provedena pokazala su da je potrebno još malo poraditi na tehnologiji i na parametrima zavarivanja kako bi se pronašla kombinacija parametara koji će zadovoljiti sve testove. Iako su uzorci 1, 3, 10 zadovoljavali vizualno te su pokazali prolazne rezultate na rendgenskom ispitivanju, nakon što su bili podvrgnuti razornim metodama ispitivanja pokazali su se u nekim ispitivanjima neuspješni. Svi ispitani uzorci na testu savijanja nisu zadovoljili jer se dogodilo pucanje epruveta. Da bi zavareni spoj zadovoljio test savijanja, epruvete bi trebale izdržati savijanje od 180° bez pojave pukotine ili sa pojavom malih pukotina dužine ne veće od 3 mm. Neke epruvete su pukle trenutno te time pokazale da im je struktura veoma krhka, a dok su sve epruvete popucale na relativno malim kutovima koji su prikazani u prethodnim tablicama te time pokazale da u nekim dijelovima zavarenog spoja imaju veoma krhku strukturu te da im je žilavost jako mala. Iako većina epruveta nije pukla na u zavarenom spoju nego na spoju metala zavara i osnovnog materijala što pokazuje da metal zavara ima dobra svojstva žilavosti i dobra ukupna mehanička svojstva, takvo pucanje epruveta na spoju nameće potrebu za daljnjim ispitivanjem parametara koji se koriste u procesu zavarivanja kako bi se došlo do onih parametara koji će dati prolazne rezultate na ispitivanju.

Ispitivanje vlačne čvrstoće pokazalo je da svi uzorci zadovoljavaju jer se nalaze unutar dopuštenih granica od 220 do 260 N/mm², no iznos vlačne čvrstoće pokazuje kako se uzorci

nalaze bliže donjoj granici od 220 N/mm^2 te da su se zavarivanjem mehanička svojstva osnovnog materijala smanjila. Smanjenje mehaničkih svojstava je uobičajeno kod zavarivanja, no potrebno je paziti da to smanjenje bude unutar granica kako ne bi došlo do loših zavarenih spojeva.

Ispitivanje makroizbrusaka potvrdilo je rendgenske snimke te je na makroizbruscima uočljivo mnoštvo sitnih ili većih mjehurića koji se nazivaju porama. Iako su pore uobičajena pojava kod zavarivanja aluminijskih legura potrebno je paziti da te pore ne budu prevelike te da im se broj smanji na što je moguće manju mjeru jer kao što se moglo vidjeti na vlačnom ispitivanju uzorci koji su imali više pora u zavarenom spoju dali su nešto niže vrijednosti vlačne čvrstoće. Makroizbrusci su osim razotkrivanja pora pokazali da je kod kutnih zavarenih spojeva potrebna predobrada uzoraka ili promjena parametara zavarivanja. Iako su zavareni spojevi izvedeni korektno na uzorku 9 gdje nije izvedena predobrada ploča nije došlo do dovoljnog protaljivanja, tj. korijen zavarenog spoja nije bio dovoljno duboko u materijalu i kada bi takav zavareni spoj bio podvrgnut vlačnom ispitivanju dao bi puno lošija mehanička svojstva.

Preporuka za sljedeća ispitivanja svakako bi bila da se produlji vrijeme hlađenja tj. da se zavarivanje odvija na većoj temperaturi okoline te da se u materijal unese nešto veća količina topline jer se kod trenutnih uvjeta formira krhka struktura zavarenog spoja te je mu žilavost izrazito niska. Kod kutnih zavarenih spojeva potrebno je povećati penetraciju metala zavora u osnovni materijal jer bi se na taj način mogla izbjeći skupa predobrada, a zavareni spoj bi imao zadovoljavajuća mehanička svojstva.

9. POPIS LITERATURE

- [1] Tehnička enciklopedija br. 1, JLS, Zagreb, 1988.
- [2] Aluminijski materijali, Metalburo, Zagreb, 1985.
- [3] Gojić, M.: Tehnike spajanja i razdvajanja materijala, Metalurški fakultet, Sisak, 2003.
- [4] doc. dr. sc. N. Dolić ; Metalurgija aluminijske legure AlMg4,5Mn, Metalurški fakultet, Sisak, 2015.
- [5] Levačić D.; Zavarivanje aluminijske legure AlMg4,5Mn, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2012.
- [6] https://www.sfsb.hr/kth/zavar/tii/al_lg.pdf , 25.08.2017.
- [7] Priručnik Hobart Guide for Aluminium Welding
- [8] Kovačević B.; Živčić M.: Zavarivanje aluminjskih materijala (treći dio): Znanstveno stručni časopis Zavarivanje br 1/2 2015.g
- [9] Praveen P.; Yarlagaadda P.K.D.V.: Meeting challenges in welding of aluminium alloys through pulse gas metal arc welding: Journal of Materials Processing Technology 164-165, 2005.
- [10] Gojić M.: Tehnike spajanja i razdvajanja materijala, Metalurški fakultet, Sisak 2003.
- [11] Kalpakjian; Schmid: Manufacturing Processes for Engineering Materials 5th ed, Pearson Education 2008.
- [12] Kralj S.; Kožuh Z.; Andrić Š.: Priručnik zavarivački i srodni postupci, Zagreb 2015.g
- [13] Karaga I.: *Značajke TIG zavarivanja impulsnim strujama*, Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [14] Ante Barišić: *Određivanje balističkih značajki zavarenog spoja čelika ARMOX 500T*, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [15] Kovačević B.; Živčić M.: Zavarivanje aluminjskih materijala (peti dio): Znanstveno stručni časopis Zavarivanje br 1/2 2015.g
- [16] Kovačević B.; Živčić M.: Zavarivanje aluminjskih materijala (šesti dio): Znanstveno stručni časopis Zavarivanje br 1/2 2015.g
- [17] Knopp N.; Lorenz H.: MIG welding of aluminium materials made easy, Mundertsbach and Robert Killing, EWM Hightech welding, Solingen, Germany
- [18] Tehnička enciklopedija br. 1, JLS, Zagreb, 1988.
- [19] <https://sites.google.com/site/gobanengineeringnotes/welding/tig-tags-welding>, 29.08.2017.
- [20] https://en.wikipedia.org/wiki/Gas_tungsten_arc_welding#/media/File:GTAW.svg, 29.08.2017.

- [21] Kralj, S., Andrić, Š.: Osnove zavarivačkih i srodnih postupaka, FSB, Zagreb, 1992.
- [22] http://www.seeberger.net/_assets/pdf/werkstoffe/aluminium/en/3.3535.pdf, 26.10.2017.
- [23] https://www.roboplan.pt/upload/arcsystem-vmf-500-s5d_56e2a15712dbe.pdf, 06.12.2017.
- [24] Đuro Đaković – Specijalna vozila, Slavonski Brod, zavarivačka radiona, 2.12.2017.
- [25] Vimetco airo, slatina, Certifikat za osnovni materijal, 24.08.2017.
- [26] http://www3.fronius.com/cps/rde/xbcr/SID-6655F297-94B1DF0C/fronius_international/Folder_CMT_leaflet_HR_0114_aw19_low_386710_snapshot.pdf, 13.12.2017.
- [27] dipl.ing Goran Vrucinic, Zavarivanje i zavarljivost aluminija i legura, Zavod za zavarivanje, ispitivanje i tehnologiju d.o.o., Zagreb, 2008.
- [28] Welding Handbook, Seventh Edition, Volume 4, Metals and Their Weldability, American Welding Society, Miami, 1997.
- [29] Laznica, Ž.: Savjetovanje, Zavarene aluminijske konstrukcije, Aluminij i legure aluminija, Šibenik, 1990.
- [30] <https://www.resale.info/en/fronius/> , 24.12.2017.